



Universidade de Aveiro
2009/2010

Departamento de Engenharia Mecânica

**Renato Jorge
Fernandes Frias**

**Definição e análise de requisitos de qualidade em
micro componentes em plástico**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2009/2010

**RENATO JORGE
FERNANDES FRIAS**

DEFINIÇÃO E ANÁLISE DE REQUISITOS DE QUALIDADE EM MICRO COMPONENTES EM PLÁSTICO

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Mónica Oliveira Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

À minha namorada, Célia Domingues, e à minha família por não desistirem de mim.

o júri

| | |
|-------------------------------|---|
| Presidente | Prof. Doutor Robertt Angelo Fontes Valente, Universidade do Aveiro |
| Vogal - Arguente Principal | Prof. Doutor Pedro Miguel Gonçalves Martinho, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Instituto Politécnico de Leiria |
| Vogal - Orientador | Prof ^a . Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia Universidade de Aveiro |

agradecimentos

Esta dissertação não seria mesma sem o suporte de algumas pessoas, às quais desejaria agradecer.

Gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Mónica Oliveira, por ter sugerido um tema tão interessante e pela sua disponibilidade (extra-horário) nos momentos que necessitei. Também, pelas suas ideias, críticas e sugestões.

À MD Moldes (Leiria), em concreto ao Sr. Manuel Domingues, pela possibilidade de uso de equipamento (software), sem o qual não teria sido possível concluir esta dissertação.

À Prof. Tatiana Zhil'tsova pela facultação de informação. À Sr.^a Teresa Neves por ter contactado a empresa Coretech System em meu nome.

Aos meus pais, Maria e Manuel, pela incentivo sempre presente.

Ao meu irmão, Ricardo.

E em especial à minha namorada, Célia, por ser o meu suporte de motivação para que eu consegui-se concluir esta dissertação.

Obrigado!

palavras-chave

Microinjecção, simulação numérica, Moldex3D, Moldflow MPI,
microcavidade

resumo

A microinjecção tem vindo a assumir um papel preponderante no mundo da indústria no que diz respeito à obtenção de micro-peças a baixo custo.

Esta dissertação aborda os conceitos inerentes à simulação numérica do processo de obtenção de micro-peças por injeção, por recurso a softwares comerciais. Para isso, procedeu-se a um estudo reológico que permitisse analisar o comportamento de fluxo de um determinado polímero no interior de uma microcavidade. O estudo foi suportado por informação extraída da literatura. Esse estudo reporta uma análise de enchimento de uma placa com cinco micro-pinos em polipropileno (PP). O caso de estudo seleccionado comparava os resultados obtidos experimentalmente com os resultados de simulação numérica por recurso ao software comercial, Moldflow Plastics Insight 6.2. No estudo aqui apresentado, efectua-se, na primeira fase o mesmo estudo mas recorrendo a um outro software comercial, Moldex3D e procede-se à exploração do potencial do mesmo para este tipo de análise. Assim, definiram-se condições de malha 3D (número de elementos) idênticas às do estudo suporte, bem como as mesmas condições de processamento. A análise dos resultados de simulação demonstra uma forte semelhança entre os estudos, no que respeita ao sobredimensionamento do comprimento de fluxo nos micro-pinos. Outros resultados de simulação revelam, também, a fraca aproximação da simulação numérica em microcavidades à realidade. Posteriormente, foi refinada a malha 3D com o intuito de validar a simulação numérica do Moldex3D relativamente aos resultados experimentais. Resultados de simulação demonstram uma maior aproximação aos resultados experimentais. Deve, no entanto, referir-se que os mesmos são comprometidos quando se dá a comutação no processo de injeção. O comportamento de fluxo descrito pelo modelo de viscosidade Cross 3 é inadequado, sobredimensionando o comportamento do polímero em microcavidades, evidenciando a enorme necessidade de proceder com mais investigação nesta temática.

keywords

Microinjection, numerical simulation, Moldex3D, Moldflow MPI,
microcavity

abstract

Microinjection has been playing a key role in industry in what concerns to micro parts production at low cost.

This study investigates the subjects bounded to numerical simulation of micro parts injection process, using commercial softwares. For that, a rheological study was accomplished that allow for the analysis of the flow behaviour of a certain polymer inside a micro cavity. The study was supported by information gathered from the literature. This study reports the filling of a thin rectangular plate with five micro pin features attached to in, polypropylene (PP). The selected study compares the experimental achieved results with the numerical ones obtained using the commercial software, Moldflow Plastics Insight 6.2. On the present work, the same study is conducted using another commercial software, Moldex3D, and it is explored the software's potential for this type of analysis. Thus, it was defined a 3D mesh condition (number of elements) matching the one carried out in the support study, as well as the same processing conditions. Numerical results reveal a strong resemblance between studies, highlighting an over prediction of flow lengths on micro pins. Other numerical results also expose the weak approach between numerical results and reality. Afterward, the 3D mesh was improved in order to validate Moldex3D's numerical simulation relating the results to the experimental obtained ones. Simulation results obtained through mesh refinement reveal a better approach to the experimental results. However, it must be referred that these ones are compromised when the switch V/P stage of injection process occurs. The filling behaviour described by Cross's 3 viscosity model is inappropriate, over predicting the polymer's behaviour inside micro cavities, highlighting the great need to further research into this field.

Índice

| | |
|---|-----|
| Índice | I |
| Lista de Figuras | II |
| Lista de Tabelas | III |
| Abreviaturas | IV |
| Revisão Bibliográfica | 1 |
| Simulação Numérica no processo de microinjecção | 11 |
| Análise de Estudo de Caso..... | 14 |
| Estudo Reológico - Moldex3D | 21 |
| Resultados do estudo reológico e discussão..... | 28 |
| Estudos reológicos (refinação de malha) | 32 |
| 1º Estudo | 32 |
| 2º Estudo | 34 |
| Resultados dos estudos reológicos e discussão..... | 37 |
| 1º Estudo | 37 |
| 2º Estudo | 41 |
| Conclusões..... | 44 |
| Referências Bibliográficas..... | 46 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Fig. 1 - Máquina de injeção [1]..... | 1 |
| Fig. 2 - Custo de processo vs N° de peças [5]..... | 5 |
| Fig. 3 - Curva de viscosidade característica de um termoplástico (log-log), adaptado de [10] | 10 |
| Fig. 4 - Modelo CAD importado [13] | 16 |
| Fig. 5 - Malha tetraédrica Moldflow [13]..... | 17 |
| Fig. 6 - Malha bidimensional | 22 |
| Fig. 7- Malha tridimensional BLM – Interior | 23 |
| Fig. 8 - Malha BLM refinada no pino - Interior | 23 |
| Fig. 9 - Enchimento total de todos os micro-pinos (fim da compactação) | 28 |
| Fig. 10 – Distribuição da temperatura de frente de fundido (corte) | 29 |
| Fig. 11 - Malha bidimensional | 33 |
| Fig. 12 - Malha tridimensional (interior) | 33 |
| Fig. 13 - Malha bidimensional | 35 |
| Fig. 14 - Malha tridimensional (interior) | 35 |
| Fig. 15 - Enchimento incompleto dos pinos (fim de enchimento) – 1º estudo | 37 |
| Fig. 16 - Enchimento completo dos pinos (inicio da compactação) – 1º estudo..... | 38 |
| Fig. 17 - Temperatura de frente de fundido (0.03s de pressão de compactação) – 1º estudo | 39 |
| Fig. 18 - Enchimento incompleto dos pinos (fim de enchimento) – 2º estudo | 41 |
| Fig. 19 - Temperatura de frente de fundido (0.03s de pressão de compactação) – 2º estudo | 42 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Comparação entre processos de replicação, adaptada de [5] | 5 |
| Tabela 2 - Parâmetros utilizados | 15 |
| Tabela 3 - Comprimento de fluxo nos micro-pinos, adaptado de [13] | 16 |
| Tabela 4 - Resultados da temperatura de fundido, extraídos do MPI, [13] | 19 |
| Tabela 5 – Quadro de qualidade de malha bidimensional..... | 22 |
| Tabela 6 - Quadro de qualidade de malha - Razão de aspecto | 24 |
| Tabela 7 - Parâmetros específicos de viscosidade do PP Moplen HP500N | 25 |
| Tabela 8 - Parâmetros específicos PVT do PP Moplen HP500N | 27 |
| Tabela 9 - Temperatura de frente de fluxo na extremidade dos pinos | 29 |
| Tabela 10 – Quadro de qualidade de malha bidimensional..... | 33 |
| Tabela 11 - Quadro de qualidade de malha - Razão de aspecto | 34 |
| Tabela 12 – Quadro de qualidade de malha bidimensional..... | 34 |
| Tabela 13 - Quadro de qualidade de malha - Razão de aspecto | 35 |
| Tabela 14 - Resultados de comprimento de fluxo e temperatura de frente de fundido - 1º estudo..... | 38 |
| Tabela 15 - Resultados de comprimento de fluxo e temperatura de frente de fundido - 2º estudo..... | 42 |

Abreviaturas

| | |
|------|--|
| BLM | <i>Boundary Layer Mesh</i> |
| BMWD | <i>Broad Molecular Weight Distribution</i> |
| COC | Copolímero de etileno - Cicloolefinas |
| COP | Copoliéster |
| DOE | <i>Design of experiments</i> |
| PA | Poliamida |
| PC | Policarbonato |
| PEEK | Poli-éter-éter-cetona |
| PMMA | Polimetacrilato de metilo |
| POM | Polioximetileno |
| PFA | Resina Perfluoroalcóxido |
| PSU | Polisulfona |
| MEMS | <i>Micro electromechanical systems</i> |

Revisão Bibliográfica

A moldação por injeção é uma das técnicas de produção de peças de plástico mais utilizadas em todo o mundo. Para tal, é necessária a concepção de moldes capazes de reproduzir geometrias complexas, sejam elas estéticas, funcionais ou ambas, em que é injectado o polímero fundido que se vai moldar na cavidade do molde. Para a injeção do polímero no molde é requerida a utilização de máquinas de injeção, onde é colocado o molde e material plástico. As máquinas de injeção são compostas essencialmente por duas partes, a unidade de injeção e a unidade de fecho (figura 1).

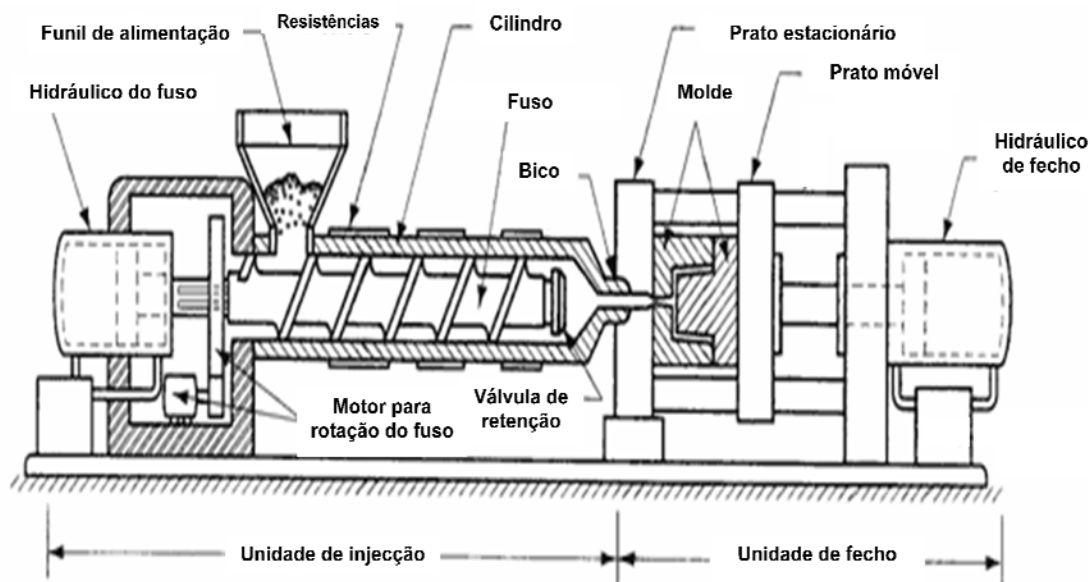


Fig. 1 - Máquina de injeção [1]

O material plástico (matéria-prima) é fundido na unidade de injeção e injectado através do fuso para o molde instalado na unidade de fecho. O plástico fundido é arrefecido dentro do molde, solidificando na peça final.

Uma das tecnologias em grande ascensão é uma variante da moldação por injeção, sendo ela a micromoldação. A sua definição exacta encontra-se distante de ser consensual. Alguns autores asseguram, que na indústria, é considerado micromoldação, todo o produto com menos de 1 mg de peso. Em muitos casos, especialistas em microfabricação, afirmam o conceito geral

utilizado na indústria: 'Peças criadas a partir de uma fracção de uma bola pequena de plástico (matéria-prima) pesando apenas fracções de grama'. A tendência no mundo da micromoldação, no que diz respeito ao quão pequeno se pode ir, é ficar com o sentimento de: se a concepção do produto é possível, é provável a sua aquisição [2].

Em geral, em microinjecção, são usados moldes em alumínio. São instaladas resistências térmicas no molde, para se controlar a temperatura durante o processo. De maneira a se ter uma melhor condutividade térmica e tempos menores de refrigeração, utilizam-se moldes em alumínio, fáceis de maquinar e modificar. Ainda com isolamento térmico e sistema de refrigeração apropriados, o problema da variação dimensional, causada pela expansão térmica, pode ser controlado e o molde de alumínio pode ser usado como uma ferramenta mais económica. Os postigos moldantes são, em geral, de níquel ou de silício.

No que diz respeito ao que ocorre dentro do molde quando o material polimérico fundido é injectado, a temperatura deste dentro da microcavidade pode reduzir rapidamente após o polímero entrar na cavidade devido à alta relação superfície – volume, podendo ocorrer mau enchimento [3]. Usando resistências para conseguir manter as zonas moldantes a uma temperatura acima da temperatura de transição vítrea, ajuda na resolução de problemas de solidificação. Contudo, aumenta o tempo de ciclo e reduz a eficiência. Mesmo assim, com o material muito viscoso, logo acima da temperatura de transição vítrea, é necessária uma pressão de injecção muito grande ou um tempo de enchimento muito grande. Para evitar problemas de fugas de gases/prisões de ar, utilizam-se sistemas de vácuo [4], desde o início do processo, de maneira a retirar o ar existente dentro da microcavidade e assim minimizar este problema.

Um dos desafios inerentes à micromoldação é a questão da contracção. Como na injecção convencional, a contracção dá-se, normalmente, da cavidade para a bucha, a extracção dá-se mais facilmente. Contudo, as pequenas peças, em micromoldação, têm menor contracção; pelo que, aquando da abertura do molde, se torna mais difícil as peças ficarem contraídas do lado móvel do molde. Isto significa que a libertação da peça da cavidade pode ser afectada significativamente pelo estado de superfície da zona moldante.

Ao nível do acabamento dos molde, enquanto em moldação convencional existem técnicas de acabamento manual (ex: polimento/brilho), em peças cujas dimensões não ultrapassam as décimas de milímetro, torna-se impossível a melhoria de acabamento à mão.

Técnicas de acabamento de peças têm sido estudadas e adaptadas à micromoldação, entre elas encontra-se a estereolitografia (SL) e o ultra-som (separação entre gito e peça). No entanto a validação deste tipo de peças continua a ser um desafio. Usando certos sistemas de visão e microscópios que ampliam até 600 vezes, torna-se possível fazer o controlo dimensional das micro-peças, sendo que melhores técnicas de medição têm vindo a ser procuradas.

À macro-escala existe maior margem para alterações de peças. Em casos onde macro-peças são alteradas em centésimas de milímetro, o acabamento superficial do produto não é colocado em causa, o que não é uma realidade em casos de micro-peças. Uma alteração na ordem das centésimas de milímetro numa micro-peça com superfície acabada pode significar a perda de $\frac{1}{4}$ da peça. Actualmente, um dos grandes problemas é a questão da tolerância, e não apenas relacionado com o mais pequeno tamanho da peça que pode ser fabricada. As técnicas de fabricação de moldes têm vindo a evoluir consideravelmente. Máquinas CNC especializadas, electro-erosão modificada e tecnologias utilizando silício e água estão a ser usadas para produzir cavidades bastante precisas para peças muito pequenas [2].

O largo sucesso dos polímeros à escala macro tem sido, em grande parte, devido à existência de processos de fabrico de grandes quantidades a baixo preço. Estes processos têm por objectivo a replicação da estrutura a adquirir nas partes moldantes do molde. Estes têm vindo a ser, progressivamente, implementados à micro-escala, reduzindo custos de produção e beneficiando a comercialização de micro-peças. Comercialmente, métodos como a compressão a quente e moldação por injeção, têm sido os mais utilizados, tendo a microtermoformação vindo a aparecer gradualmente [5].

Compressão a quente de plásticos é uma das vias mais utilizadas para produzir superfícies microestruturadas. Esta técnica baseia-se essencialmente na impressão de um padrão no polímero amolecido até à sua temperatura de

transição vítrea. Polímeros, tais como PC e PMMA são usados frequentemente nesta tecnologia. Devido aos tempos de ciclo de 10 a 30 minutos para realizar uma peça e os custos do molde serem inferiores aos necessários em moldação por injeção convencional, esta técnica é frequentemente utilizada na produção de protótipos [6].

A microtermoformação surge da tão conhecida termoformação no mundo macro, que se destaca pela sua produção a baixo preço de dispositivos plásticos de muito pequena espessura, como os copos de iogurte. Consiste numa pouco espessa (geralmente inferior a 50 μm) folha de material plástico fechada num molde que num lado contem a microestrutura a replicar. A folha é aquecida e comprimida contra a microestrutura por intermédio de gás comprimido a 40-60 bar. Logo de seguida, o polímero é arrefecido e extraído. Este processo assenta sobre a simplicidade e rapidez. A eficácia da replicação e a aquisição de peças com elevada razão de aspecto e arestas vivas é limitada quando comparando com as peças obtidas por compressão a quente.

Outra tecnologia existente é a moldação por injeção por compressão, também conhecida como processo do CD. Esta integra uma combinação de princípios básicos das tecnologias de moldação por injeção e compressão a quente. Foi inicialmente desenvolvida para a indústria de armazenamento digital (CDs e DVDs) e tem vindo a ser usada em micro dispositivos de geometria circular. O processo tem a vantagem de usar tempos de ciclo mais curtos que em moldação por injeção, assim como alcançar a eficácia da replicação obtida pela compressão a quente, essencialmente comprimindo com o punção, o material fundido na cavidade. Tem a desvantagem de ser um processo limitado, pelo que a maioria dos equipamentos é destinado à produção de CDs e DVDs. Na tabela 1, podem-se comparar os diferentes processos de replicação.

Tabela 1 - Comparação entre processos de replicação, adaptada de [5]

| Processo | Fundição | Compressão a quente | Moldação por injeção | Moldação por injeção por compressão |
|--|----------------------------|----------------------------------|--|--|
| Processo e setup do equipamento | Simples (horas) | Médio (horas-dias) | Difícil (dias) | Difícil (dias) |
| Equipamento / infraestrutura requerida | Muito baixa | Baixa (água e electric. – 10 kW) | Alta (água e electric. – 20 kW, secagem e alimentador de material) | Alta (água e electric. – 20 kW, secagem e alimentador de material) |
| Ferramenta requerida | Muito baixa | Baixa (Postiços moldantes) | Alta (Molde bucha / cavidade) | Alta (Molde bucha / cavidade) |
| Tempo de ciclo | Longo (min. - horas) | Médio (min.) | Curto (seg. – min.) | Muito curto (seg.) |
| Flexibilidade geométrica | Alta | Média (2D) | Alta (3D) | Limitada |
| Disponibilidade de equipamento | Sem necessidades especiais | Fornecedores diversos | Fornecedores diversos | Médio |
| Produção automática | Inexistente | Média | Alta | Muito alta |
| Disponibilidade do processo | Sim | Limitada | Sim (parcialmente) | Sim |

Em termos de custos dos processos (micromoldação, compressão a quente e fundição de materiais elastómeros) com o número de peças produzidas, pode-se verificar a evolução na figura 2.

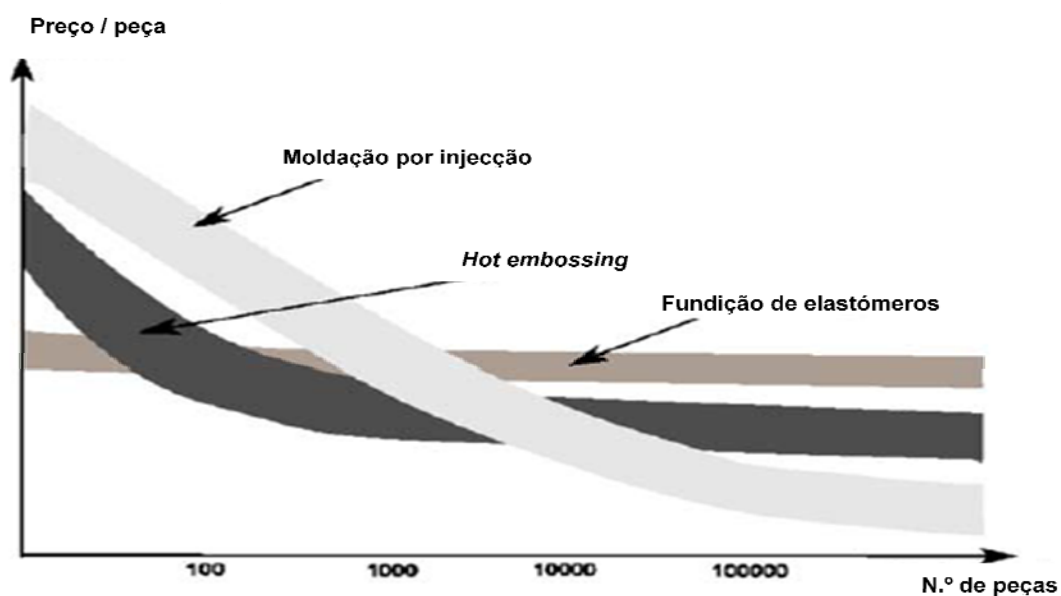


Fig. 2 - Custo de processo vs N° de peças [5]

Na literatura, a fundição de materiais elastómeros, apresenta-se como a tecnologia mais discutida. Existe quem designe esta tecnologia *soft lithography*. O sucesso deste processo deve-se essencialmente aos seguintes parâmetros: simplicidade do processo, propriedades dos materiais, custo, superfícies quimicamente vantajosas e exactidão da replicação. Métodos de fabricação, tais como replica, micromoldação assistida com solvente (SAMIM), moldação por microtransferência (μ TM) e micromoldação em capilares (MIMIC), fazem parte da *soft lithography* e têm vindo a ser desenvolvidos para fabricação de microestruturas poliméricas. Estes processos são utilizados na fabricação de produtos biomédicos, tais como diagnósticos microfluídicos, engenharia de tecidos e farmácia [5]. Existem ainda dois métodos de fabricação com os quais se é capaz de produzir microestruturas poliméricas suspensas, analogamente aos dispositivos em silício produzidos utilizando técnicas de processamento MEMS. São eles o *Sacrificial Layer Micromolding* (SLaM) e *Patterned Substrate Micromolding* (PSM) [7]. Os processos apresentam capacidade de produzir microestruturas poliméricas a partir de termoplásticos com resoluções ao nível das resoluções adquiridas num processo de *photolithography*.

No que diz respeito a tecnologias para a fabricação de produtos à escala micro (normalmente protótipos), devem referir-se aquelas que envolvem a reacção do polímero com a luz. Basicamente, consistem na estruturação da micro-peça por reacção de polimerização induzida pelo feixe de luz no material líquido, solidificando-o. Neste campo, existem várias tecnologias que se vão utilizando à escala micro, sendo elas a *Photolithography*, Estereolitografia e *Laser Ablation* [5].

No campo da compreensão do comportamento do processo (leitura de temperaturas e pressões), são utilizadas tecnologias promissoras e em crescimento como as ondas ultra-sónicas, forças atómicas microscópicas e nanoidentação [2].

Como seria de esperar, no campo da micromoldação, normalmente não se produz ainda uma peça micro sem a necessidade de utilizar uma operação suplementar. Com o intuito de deixar as peças com a funcionalidade requerida, estas tarefas podem representar 80% dos custos da fabricação dos produtos. Existem vários tipos de operações após produção da peça que podem ser conduzidas até à peça em questão ser final, sendo elas: corte e laminação,

fabricação de eléctrodos, encapsulação, adesão, aplicação de adesivos, ligação térmica e de pressão, ligação por solvente, soldadura ultrasónica, soldadura a laser e modificação de superfície.

Duas tecnologias de microestruturação poliméricas em ascensão são a maquinação de precisão e *plasma etching* [9].

Além das indústrias electrónicas e de telecomunicações, a micromoldação torna-se cada vez mais comum na indústria da biotecnologia e médica [6].

Um dos campos de grande exigência é o da cirurgia dentária em que se necessita de produtos com elevada razão de aspecto (relação comprimento/espessura). Neste campo é necessário utilizar polímeros de alta fluidez, mas a exigência desta indústria, faz com que o componente tenha de ser constituído com polímero higroscópico reforçado com 60% em peso de fibra opaca de raio-X. É normal usar projectos de molde de 3 placas na concepção deste tipo de peças (especificamente, peças com 0.06g e 43 mm de comprimento e diâmetro numa ponta de 0.18 mm), isto porque se torna mais fácil injectar as peças directamente no eixo da peça e numa ponta [8].

Na micromoldação é comum a utilização de materiais e de novos métodos para aquisição de novas geometrias, tolerâncias apertadas e melhores qualidades de acabamento.

Actualmente, é utilizada, em micromoldação, uma vasta gama de materiais termoplásticos dependendo da aplicação. Aplicações estas que se estendem pelos campos da medicina, defesa e mercado automóvel. Existem materiais susceptíveis de resistir a altas temperaturas (PEEK), resistir a ambientes quimicamente agressivos (PFA), polímeros com cargas são utilizados como condutores eléctricos, polímeros que apresentam, após moldação, propriedades macias e elásticas (POM), outros que são duros e frágeis (PSU), com propriedades ópticas (COP, COC, PC, PMMA), ou opacas (PA), ou ainda que apresentem propriedades piezo-eléctricas (PVDF) [4].

No campo médico está-se a ir de encontro a implantes e dispositivos construídos a partir de polímeros biorenováveis. Estes materiais são absorvidos pelo corpo humano semanas ou meses depois de terem cumprido o seu objectivo e de o tecido ter recuperado. Com o corrente uso de metais em

opções médicas, por vezes surgem reacções adversas a estes, logo a alteração para materiais plásticos torna-se praticamente inevitável. Apesar dos polímeros de alto desempenho terem preços muito elevados, existe para os fabricantes uma ampla diversidade de materiais biocompatíveis. Os metais têm vindo a ser substituídos por matérias plásticas com cargas de material *radiopáco* de maneira a se tornar visível em imagens raio-X. Contudo, estes materiais (biorenováveis/biodegradáveis) apresentam ainda alguns problemas na sua utilização. Uma é que eles podem começar a degradar, quando expostos a temperaturas de radiação elevadas. Como resultado, terá de existir uma maior inovação no que diz respeito à concepção das peças em que se usarão estes materiais.

Com o elevado custo destes materiais, torna-se extremamente dispendioso, o desperdício excessivo de material (ex: gito) além daquele que conduzirá à formação do produto final. Assim, a optimização do processo, torna-se um passo essencial, no que diz respeito à redução de custos em material plástico [2]. Outro modo, será os fabricantes dos materiais plásticos, que fornecem para esta indústria, navegarem na mesma direcção da evolução da micromoldação, isto é, a quantidade de material plástico a comprar, poder ser muito inferior ao que é neste momento, visto que em micromoldação muitas das peças são adquiridas com massa inferior a apenas uma bola de matéria-prima [9].

Os comportamentos de fluxo dos materiais no interior das microcavidades do molde não estão completamente compreendidos. Acredita-se que devido à grande relação superfície – volume, os efeitos da superfície dominarão o comportamento de fluxo à micro-escala. Com a utilização de diferentes softwares de simulação, diferentes combinações de parâmetros de processo podem ser simulados de maneira a se investigar o comportamento de fluxo do material plástico, a relação entre parâmetros de processo e a qualidade das microestruturas moldadas. Usando estes resultados, os parâmetros significativos podem ser identificados e possíveis estratégias de processamento podem ser propostas e simuladas para testar praticabilidade. Como as peças moldadas são normalmente com uma geometria complexa e a reologia do polímero é geralmente não-Newtoniana e não-isotérmica, torna-se extremamente difícil analisar o processo de enchimento das peças sem

quaisquer simplificações. O modelo generalizado de *Hele-Shaw* (GHS) é a aproximação mais comum e recorre a equações simplificadas para não-isotérmico e não-Newtoniano e escoamentos inelásticos numa pequena cavidade. Algumas simplificações que o modelo utiliza são: a espessura da cavidade ser muito mais pequena que as outras dimensões; a componente da velocidade na direcção da espessura é desprezável, e a pressão é função de apenas x e y ; as regiões de fluxo são consideradas como sendo um bom desenvolvimento dos fluxos *Hele-Shaw* em que a inércia e as forças gravitacionais são muito inferiores às forças viscosas. As equações destes modelos são não-lineares.

Softwares de simulação que utilizam *solvers* numéricos com base em elementos finitos híbridos, método das diferenças finitas, são usados para encontrar pressões, velocidades e temperaturas. Devido a estas aproximações, o modelo GHS não consegue prever o escoamento exacto no que diz respeito à frente de fluxo ou fim da cavidade. Isto poderá ser devido a erros na previsão do comportamento de fluxo em microcavidades [3].

Neste campo da reologia dos termoplásticos, a viscosidade dos materiais apresenta a ligação com os fenómenos que ocorrem no escoamento do material polimérico na cavidade do molde. Sendo a viscosidade, o índice de resistência do material fluido ao escoamento, e nos polímeros termoplásticos, estes apresentarem-se como um fluido não linear, a viscosidade depende da estrutura química, composição e condições de processamento destes mesmos materiais. Dada a sua estrutura e formulação química, a viscosidade dos termoplásticos depende da temperatura, taxa de corte e pressão.

Existem diferentes modelos matemáticos considerados para expressar o comportamento de viscosidade dos termoplásticos. Entre eles, existe o modelo de Fluido Newtoniano que assume que a viscosidade é independente da temperatura e da taxa de corte. Apresenta forma matemática simples desprezando as características não-lineares dos polímeros termoplásticos. Não é recomendado para simulação.

Outro modelo é o da Lei da Potência, onde a viscosidade depende da taxa de corte e esta pode ser simplificada como uma equação simples da Lei da Potência. Nos casos em que este modelo é utilizado em simulação de

escoamento termoplástico, uma fraca estimativa da viscosidade a baixas taxas de corte pode ser gerada.

O modelo Cross 1 que descreve a dependência da taxa de corte a partir do 1º regime newtoniano e da Região de comportamento pseudoplástico em que a viscosidade diminui com a taxa de deformação (figura 3).

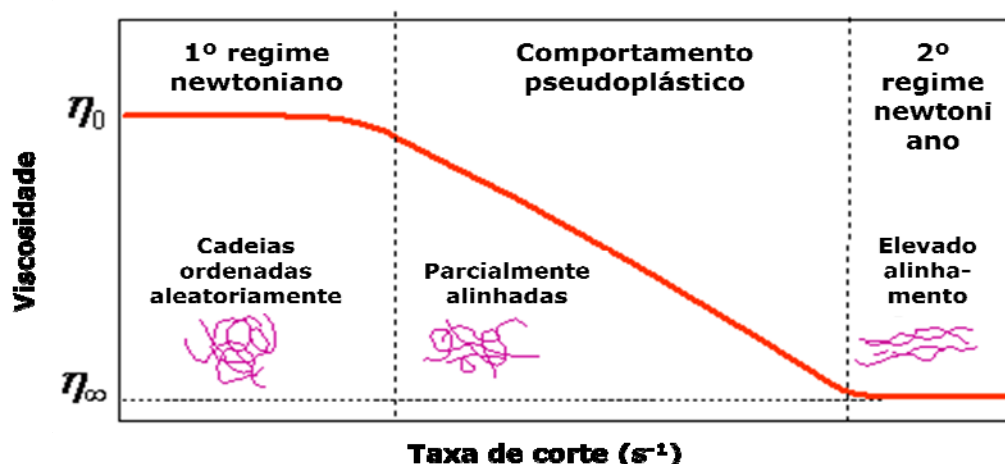


Fig. 3 - Curva de viscosidade característica de um termoplástico (log-log), adaptado de [10]

O modelo Cross 2 é muito idêntico ao modelo Cross 1, descrevendo também a dependência do Cross 1. É, geralmente, mais adequado a termoplásticos com elevado peso molecular (BMWD). Neste modelo existe uma dependência exponencial com a temperatura, sendo assim, também conhecido por modelo Cross-Exp.

Existe, um terceiro modelo, o Cross 3, sendo uma modificação do Cross 2. Este substitui a dependência da temperatura da sua forma exponencial para a forma William-Landel-Ferry (WLF). Este é então conhecido por modelo Cross-WLF. Normalmente, este modelo apresenta uma melhor precisão correlacionando viscosidade a baixa temperatura. Para temperaturas que não excedam a temperatura de transição vítrea mais 100 °C ($T_g + 100\text{ °C}$), este modelo é geralmente melhor que o Cross-Exp.

O modelo de Carreau, à semelhança do Cross 1, também descreve a mesma dependência de taxa de corte. Considera, também uma dependência na temperatura e pode ser apelidado de modelo de viscosidade Carreau-Exp. [10]

Simulação Numérica no processo de microinjecção

Os comportamentos de fluxo dos materiais no interior das microcavidades do molde não estão completamente compreendidos. Com a utilização de diferentes softwares de simulação numérica que utilizam *solvers* numéricos com base em elementos finitos híbridos, método das diferenças finitas, diferentes combinações de parâmetros de processo são simulados de maneira a se investigar o comportamento de fluxo do material plástico, a relação entre parâmetros de processo e a qualidade das microestruturas moldadas. Usando estes resultados, os parâmetros significantes são identificados e possíveis estratégias de processamento podem ser propostas e simuladas para testar praticabilidade. [3]

A simulação numérica em microinjecção permitirá atingir vários objectivos, entre eles, a visualização e previsão do percurso do material plástico dentro da microcavidade. Isto torna-se fundamental para a identificação de defeitos que estão usualmente associados a enchimento incompleto, uniões de material e vazios. Outro, é a optimização do projecto de molde, tornando-o mais económico, visto ser extremamente dispendioso fabricar moldes e simular diferentes geometrias e espessuras das peças, gitos e ataques de diferentes sistemas de injecção, para determinar qual a melhor forma de injectar peças. É possível simular condições térmicas de enchimento e refrigeração da peça, o que será útil para estimar tempos de ciclo e para homogeneizar a temperatura na peça durante estas fases e assim prevenir problemas de, essencialmente, tensões residuais na peça que conduzirão a deformação e qualidade do produto final reduzida. Parâmetros, como a deformação e a contracção podem ser também identificados por softwares de simulação numérica. Também, é possível determinar qual o parâmetro de injecção de maior influência na qualidade da peça.

A simulação do processo de injecção por moldação à macro-escala tem sido um desafio constante devido às muitas variáveis implícitas no processo assim como, a natureza não-Newtoniana dos polímeros. À micro-escala, a

simulação numérica depara-se com um novo desafio, o das diferentes propriedades físicas dos materiais.

Os softwares de cálculo numérico utilizam uma malha de elementos, geralmente triangulares, que representam a geometria da peça. A construção da malha pode ser obtida através de dois métodos distintos: bidimensional (2.5D - superfícies) ou tridimensional (3D - volume). Em moldação convencional é muito comum a utilização do módulo de construção de malha em 2.5D, ou seja, gerando a malha a partir de superfícies representativas da geometria da peça. Este módulo despreza o efeito implícito no escoamento do material nas superfícies laterais da peça, raios e algumas variações de espessura, não dando a exactidão requerida em micromoldação (ex: enchimento sobredimensionado). O módulo tridimensional (3D) aparece como o mais indicado em simulação de micro-peças devido às limitações apresentadas pelo método 2.5D. O escoamento numa microcavidade utilizando um sistema 2.5D, afasta o modelo de aproximação Hele-Shaw, frequente em simulação de micro-peças, uma vez que não consegue reproduzir o efeito de 'fonte' e os gradientes de pressão existentes. Efeitos pouco relevantes à escala macro passam a ser extremamente importantes à micro-escala, devido ao aumento da razão superfície/volume, tais como a rugosidade da superfície, aquecimento por atrito e arrefecimento da frente de fluxo devido à elevada perda de temperatura em micro-geometrias. Os modelos reológicos a utilizar deverão considerar os efeitos implícitos da transferência de calor e massa. O coeficiente de transferência de calor já foi referido como sendo um importante factor na micro-escala. [11]. A natureza visco-elástica dos polímeros é também um factor preponderante neste campo visto serem geradas altas taxas de corte, como nos ataques de reduzidas dimensões. Condições especiais de processamento devem ser consideradas em micromoldação, tais como a utilização do processo variotérmico ou colocação do molde sobre vácuo antes de se efectuar o enchimento. [12]

A literatura evidencia que devido às aproximações, os modelos reológicos ainda não conseguem prever o comportamento exacto no que diz respeito ao escoamento do material plástico. Isto poderá ser devido a erros na previsão do comportamento de fluxo em microcavidades. A influência destes modelos reológico em microinjecção torna-se, então, um importante objecto de

estudo. A literatura apresenta já vários estudos realizados com vista a se perceber até onde os softwares de simulação numérica estão preparados para fornecerem resultados fidedignos aos seus utilizadores, quando aplicados à micro-escala, em que são exploradas diversas combinações de parâmetros de injeção, e em como estas combinações afectam o comportamento de fluxo e a qualidade das micro-peças, sendo possível apurar qual ou quais os parâmetros mais influentes no comportamento reológico de material polimérico para um dado caso de estudo. As combinações de parâmetros são realizadas com vista a se retirarem resultados de previsão de enchimento para comparação com resultados obtidos experimentalmente. Um dos estudos realizados é descrito no próximo capítulo, tendo sido de seguida realizado o mesmo estudo recorrendo à utilização de um outro software de simulação, de modo a se retirarem conclusões sobre como diferentes programas de simulação numérica podem ou não apresentarem resultados semelhantes em termos de enchimento de micro-peças.

Análise de Estudo de Caso

Este capítulo tem como objectivo a comparação entre softwares de simulação numérica, no que respeita ao comportamento de enchimento e temperatura de frente de fluxo e em como estes dependem de diversos factores, tais como temperatura de fundido, temperatura do molde e velocidade de injeção.

O estudo seleccionado intitula-se por “On the suitability of the conventional injection moulding process for micro featured parts replication – a DOE approach” [13]. Neste artigo, pretendeu-se investigar e identificar experimentalmente, quais os parâmetros de processamento mais relevantes na replicação de micro geometrias. As condições experimentais utilizadas foram transitadas para o plano teórico do processo de injeção, isto é, foi realizada a simulação com recurso ao software de simulação numérica Moldflow Plastic Insight MPI6.2.

Neste estudo, foi inicialmente concretizada a parte experimental em que foi aplicado o método ortogonal DOE de Taguchi [13] de forma a se identificarem os parâmetros relevantes expressos anteriormente. Foi necessária a utilização de uma máquina de injeção por moldação de marca EURO INJ, modelo D065, de 65 toneladas de força de fecho máxima, diâmetro de fuso igual a 32 mm e pressão de injeção máxima de 177,7 MPa. A geometria testada consistiu numa cavidade rectangular de dimensão de aresta de 45.8 mm e com 0.6 mm de espessura. Nesta placa, existem cinco micro-furos com 0.2 mm de diâmetro e com profundidades de 400, 600, 800, 1000 e 1200 μm , produzindo razões de aspecto entre 2 e 6. Foram seleccionados os parâmetros a serem estudados por intermédio do método DOE de Taguchi, sendo eles a temperatura de fundido, temperatura do molde e velocidade de injeção variando em três níveis: baixo, médio e elevado. O método DOE de Taguchi aplicado baseia-se nos princípios do desenho estatístico de experiências factoriais, desenhando conjuntos de experiências fraccionadas, sob a forma matricial, sendo usados de acordo com o número de factores e dos níveis considerados no estudo. Assim, na forma factorial, tem-se 3^3 (3 factores e 3 níveis), ou seja 27 experiências a serem concretizadas. Nestes casos, Taguchi propõe um vector ortogonal L9 que contemple apenas 9 das experiências, criteriosamente seleccionadas, de forma

a extrair do estudo grande parte da informação redundante e reduzindo o tempo e custo experimental [14]. As nove experiências foram realizadas de acordo com as combinações expressas na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados

| Experiência N.º e factor de combinação | Temperatura material (°C) | Temperatura molde (°C) | Velocidade de injeção (% velocidade máxima de injeção) |
|--|---------------------------|------------------------|--|
| 1_111 | 220 | 20 | 20 |
| 2_122 | 220 | 35 | 50 |
| 3_133 | 220 | 50 | 80 |
| 4_212 | 235 | 20 | 50 |
| 5_223 | 235 | 35 | 80 |
| 6_231 | 235 | 50 | 20 |
| 7_313 | 250 | 20 | 80 |
| 8_321 | 250 | 35 | 20 |
| 9_332 | 250 | 50 | 50 |

Foi seleccionado o polímero polipropileno (PP) a injectar, de referência Moplen HP500N da Basell Polyolefins Europa. A temperatura do molde foi mantida na escala recomendada pelo material.

Para cada combinação de parâmetros, foram produzidas 15 peças, e destas foram retiradas dez peças aleatoriamente, e foi calculada a média ponderada dos comprimentos de fluxo nos micro-pinos, após terem sido medidos com o auxílio de um microscópio óptico Nikon ECLIPSE LV150.

Os resultados de comprimento de fluxo, para cada combinação de factores, podem ser consultados na tabela 3. Cada valor expresso na tabela 3, consiste no resultado da média ponderada das 10 medições efectuadas.

Tabela 3 - Comprimento de fluxo nos micro-pinos, adaptado de [13]

| Ensaio | Profundidade alcançada (μm) | | | | |
|--------|--|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | 400 μm | 600 μm | 800 μm | 1000 μm | 1200 μm |
| 1 | 400 | 552.11 | 519.78 | 519.11 | 528.78 |
| 2 | 400 | 600 | 800 | 994.50 | 1184.40 |
| 3 | 400 | 600 | 800 | 988 | 1181.25 |
| 4 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1187.1 |
| 5 | 400 | 600 | 800 | 993.60 | 1186.30 |
| 6 | 400 | 600 | 735.30 | 818.20 | 761 |
| 7 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1177.78 |
| 8 | 400 | 600 | 710.56 | 732.44 | 726.56 |
| 9 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1192.20 |

Foi, posteriormente à parte experimental, conduzida a parte de carácter teórico em que foi utilizado o software de simulação numérica Moldflow MPI6.2, de forma a se obterem resultados para comparação com os resultados experimentais. Foi importado o modelo CAD com o canal frio anexado (figura 4) sendo gerada a malha 3D tetraédrica.

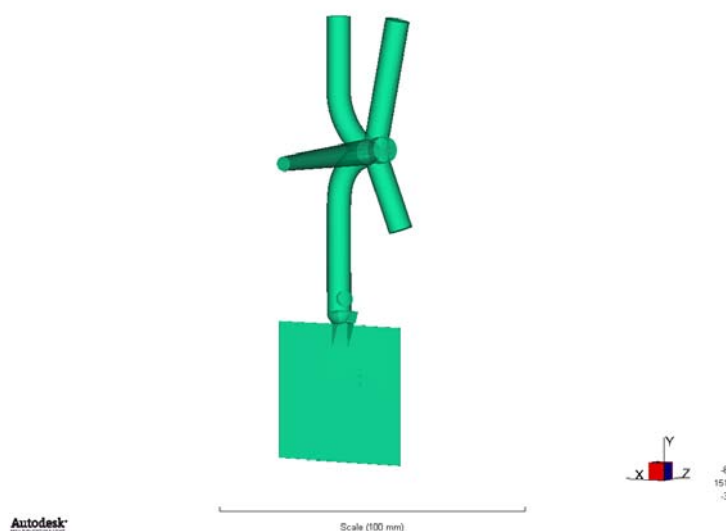


Fig. 4 - Modelo CAD importado [13]

Tendo em consideração a grande diferença entre as dimensões dos micro-pinos e as do restante modelo, a malha dos micro-pinos foi refinada de modo a serem obtidos resultados com maior precisão nos pinos (figura 5). Assim, o

comprimento de aresta dos elementos tetraédricos foi definido com 100 μm para os pinos e 1 mm para o restante modelo, incluindo o canal frio. A definição de dimensões diferentes foi realizada com vista a, também, se conseguir reduzir o número de elementos de forma a se conseguir reduzir o tempo de cálculo computacional. O número de elementos tetraédricos gerados foi de 282476.

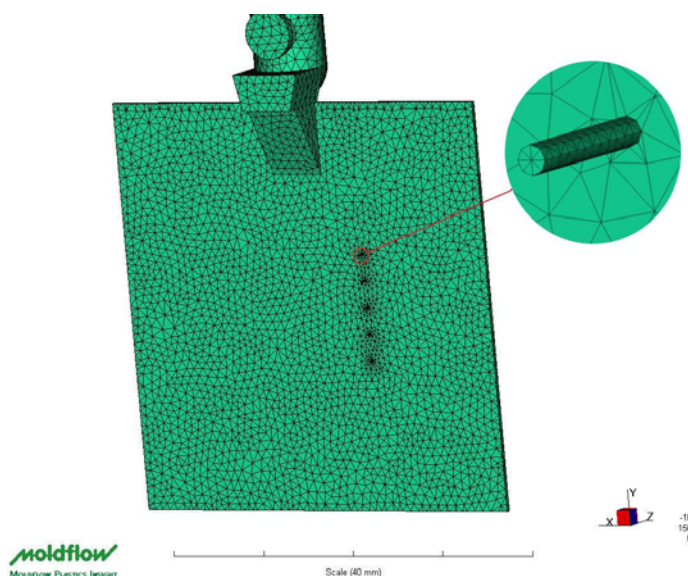


Fig. 5 - Malha tetraédrica Moldflow [13]

O cálculo foi realizado com base nas condições experimentais e com base no modelo de escoamento Navier Stokes. O modelo de viscosidade utilizado que traduz o escoamento do polímero foi o modelo Cross Williams-Landel-Ferry (WLF), com a pressão e a temperatura como factores dependentes. Ao nível do modelo pressão - volume - temperatura (PVT), o polímero rege-se pelo modelo modificado Tait 2.

Neste estudo, a análise dos resultados experimentais foi realizada com auxílio da ferramenta do quociente sinal-para-ruído (SN) de Taguchi. Esta ferramenta é usada para determinar o desvio da característica de qualidade a partir do valor desejado, podendo solucionar um problema de natureza específica. Existem vários tipos de SN, sendo os mais conhecidos: O valor-alvo é o melhor; o menor valor é o melhor (quanto menor, melhor); o maior valor é o melhor (quanto maior, melhor). Neste caso específico, o valor requerido é o maior comprimento de micro pino enchido sendo, consequentemente, usado o tipo SN quanto maior, melhor. Este tipo SN rege-se pela equação:

$$SN_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

em que i é o número da experiência, y é o resultado e n é o número de testes em cada experiência.

Após o cálculo dos resultados, verificou-se que o sinal-para-ruído aponta para a velocidade de injeção como o parâmetro mais importante a afectar o enchimento dos micro-pinos, o que se pode também constatar quando analisando os resultados da tabela 3, em que com nenhuma das combinações de parâmetros foi possível encher completamente os micro-pinos de maior razão de aspecto (6) e onde se verifica que nos ensaios em que ocorre maior incapacidade de enchimento, ou seja, solidificação prematura do material polimérico, todos têm uma condição em comum, a baixa velocidade de injeção. Nas simulações numéricas foi verificado que, em todas as combinações de parâmetros, todos os micro-pinos foram completamente cheios o que aponta para lacunas no modelo de viscosidade usado quando representando o enchimento em microcavidades. Contudo, foi obtida informação retirada das simulações numéricas que indicam a mesma tendência do observado experimentalmente, sendo ela a queda de temperatura do material fundido na extremidade dos pinos. Os valores de temperatura de frente de fundido, obtidos nas 9 simulações numéricas, encontram-se na tabela 4.

Tabela 4 - Resultados da temperatura de fundido, extraídos do MPI, [13]

| Ensaio | Temperatura de frente de fundido (°C) | | | | |
|--------|---------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | 400 μm | 600 μm | 800 μm | 1000 μm | 1200 μm |
| 1 | 215.8 | 218.2 | 213.5 | 205.0 | 181.8 |
| 2 | 219.8 | 219.6 | 219.5 | 216.4 | 217.4 |
| 3 | 223.2 | 222.5 | 222.9 | 220.2 | 220.3 |
| 4 | 235.0 | 233.9 | 233.9 | 233.0 | 235.7 |
| 5 | 237.7 | 236.1 | 234.9 | 235.4 | 235.0 |
| 6 | 228.8 | 229.0 | 224.0 | 210.7 | 209.1 |
| 7 | 250.1 | 250.1 | 249.9 | 249.6 | 249.4 |
| 8 | 241.9 | 240.6 | 230.3 | 233.0 | 193.8 |
| 9 | 250.0 | 249.7 | 247.8 | 248.8 | 244.3 |

A leitura desta tabela foi traduzida em termos de queda de temperatura e foi apresentada no gráfico 1.

Pela análise do gráfico 1, foi retirado que as combinações de parâmetros onde ocorre maior queda de temperatura (ensaios 1, 6 e 8) e, conseqüentemente, onde existiu maior solidificação de material e incapacidade de enchimento, vão de encontro aos resultados apresentados na tabela 3, obtidos experimentalmente.

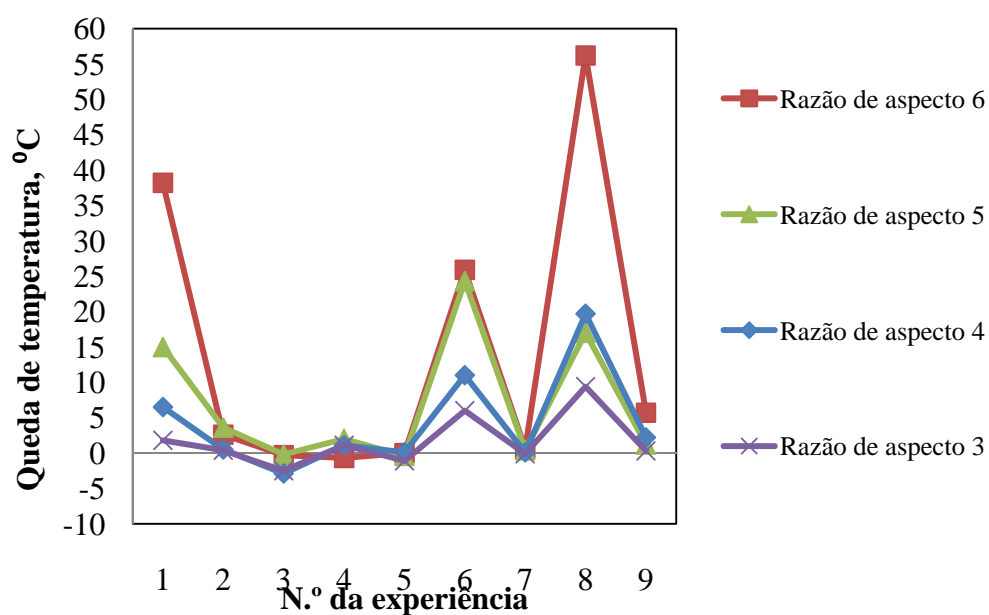


Gráfico 1 - Queda de temperatura (°C), adaptado de [13] *

* Os valores positivos indicam a queda de temperatura e os valores negativos indicam aumento de temperatura devido ao aquecimento por atrito.

Neste estudo foi concluído que, dos parâmetros de processamento em estudo, a velocidade de injeção apresenta-se como o parâmetro mais significativo, seguida da temperatura de fundido e temperatura do molde. Foi verificado que com nenhuma das combinações de parâmetros foi possível encher completamente os pinos de razão de aspecto maior (6) e que o comprimento de fluxo nos pinos, calculado pela simulação numérica, não se aproxima do obtido experimentalmente, facto já evidenciado na literatura.

Estudo Reológico - Moldex3D

No sentido de explorar o potencial e adequabilidade de um outro software comercial, muito utilizado na indústria de injeção convencional, foi então realizado um outro estudo que consistiu na utilização do Moldex3D R9.1 da Coretech Systems. O Moldex3D utiliza um software auxiliar para geração e optimização da malha do modelo, podendo ser preparada em 2.5D em que são criadas superfícies que representam a peça, sendo criada e optimizada uma malha de triângulos bidimensional, sendo de seguida efectuada a atribuição das espessuras, correspondentes ao modelo CAD, à malha bidimensional; ou também pode ser preparada no módulo 3D (sólido) em que é gerada a malha bidimensional directamente sobre as superfícies do modelo CAD, sendo posteriormente optimizada para ser gerada através desta a malha tridimensional, que pode ser tetraédrica, BLM, híbrida, entre outras [10]. Esse programa auxiliar designa-se Rhinoceros V4. Pelas razões evidenciadas anteriormente relativamente ao uso de malhas criadas em 2.5D, este estudo foi realizado recorrendo à técnica de preparação de malha de elementos em 3D. Foi realizada a importação do modelo IGES, mesmo modelo CAD utilizado no estudo descrito no capítulo 'Análise de Estudo de Caso', que consiste na peça com canal frio (gito) agregado à mesma. A peça consiste numa placa de dimensões 45.8 x 45.8 x 0.6 mm com cinco micro-pinos espaçados na placa, todos com diâmetro de 0.2 mm e de diferentes alturas, 400, 600, 800, 1000, 1200 µm. A malha de triângulos bidimensional foi gerada sobre as superfícies exteriores do CAD com dimensões de aresta de 0.8 mm para os triângulos da placa e canal de injeção. Como os pinos têm dimensões muito inferiores relativamente às dimensões da placa, a malha dos pinos foi, necessariamente, mais refinada de forma a se reproduzir a geometria com maior precisão. Esta zona da malha foi refinada com uma dimensão de aresta de triângulo de 0.1 mm (figura 6).

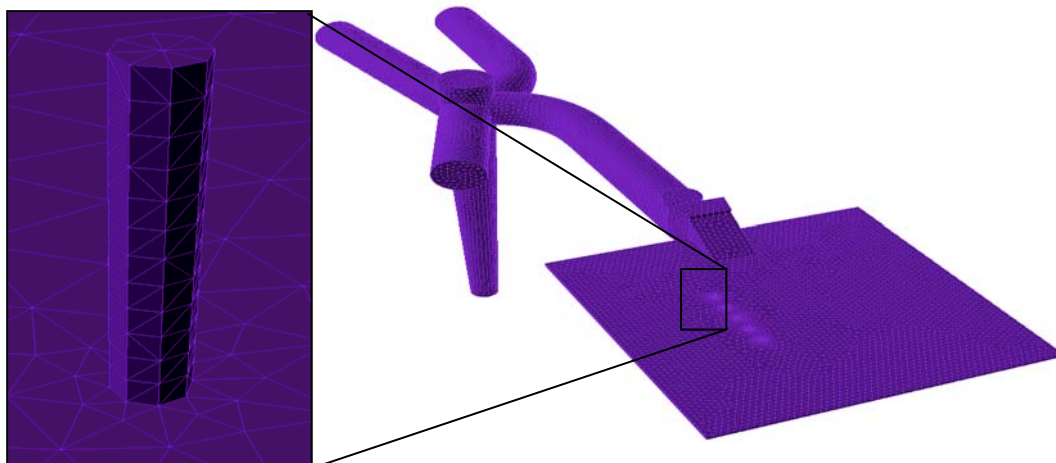


Fig. 6 - Malha bidimensional

A quantidade de elementos bidimensionais na malha de superfície é de 35534. A qualidade de malha bidimensional traduz-se através da razão de aspecto sendo, no Moldex3D, o valor de 0.6, estabelecido por defeito. A malha bidimensional, foi otimizada com vista a se conseguir excluir qualquer elemento com razão de aspecto abaixo de 0.6 (tabela 5). A razão de aspecto média resultante foi de 0.98.

Tabela 5 – Quadro de qualidade de malha bidimensional

| Razão de aspecto | < 0.6 | 0.6 – 0.7 | 0.7 – 0.8 | 0.8 – 0.9 | 0.9 – 1.0 |
|------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| N.º de elementos | 0 | 23 | 457 | ~ 1600 | ~ 33500 |
| Percentagem (%) | 0 | ~ 0.0006 | ~ 1.3 | ~ 4.5 | ~ 94.3 |

No Moldex3D, a geração de malha sólida, pode ser realizada utilizando processos algo distintos. Um deles é a geração de uma malha tetraédrica utilizando a malha bidimensional previamente realizada. Um outro método consiste também na criação de uma malha tetraédrica, mas com duas *layers* de elementos triangulares prismáticos em toda a fronteira exterior do modelo CAD. Os elementos tetraédricos vão preencher todo o restante volume do modelo (figuras 7 e 8). Este tipo de malha tridimensional designa-se por *Boundary Layer Mesh* (BLM).

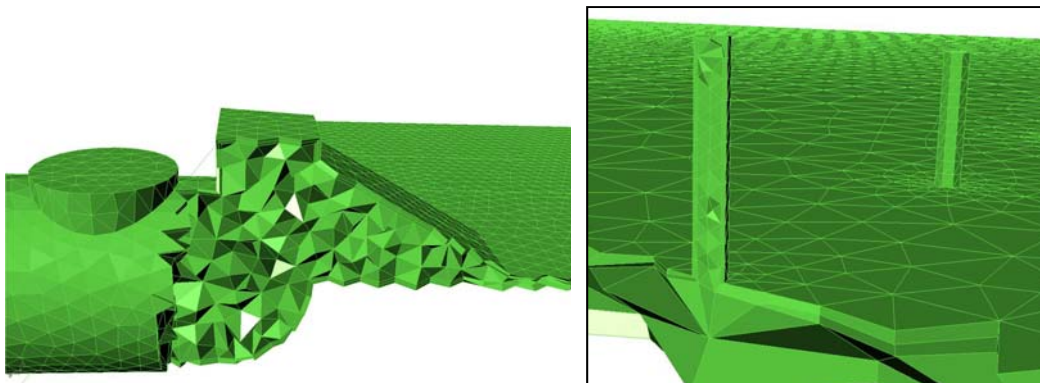


Fig. 7- Malha tridimensional BLM – Interior Fig. 8 - Malha BLM refinada no pino - Interior

Foi seleccionado este método visto conseguir-se atingir uma melhor definição do modelo na sua fronteira e com melhor qualidade de malha interna do que utilizando apenas a malha tetraédrica, gerando resultados mais precisos [10]. Foi gerada a malha sólida usando o método BLM. A quantidade de elementos sólidos gerados automaticamente foi de 225888 com uma razão de aspecto média de 0.82. As arestas dos elementos bidimensionais foram ajustadas de maneira à quantidade de elemento tridimensionais a serem gerados, ser o mais próximo possível do número de elementos gerados do estudo para comparação. Na verificação da qualidade de malha tridimensional, são considerados quatro parâmetros, sendo eles a razão de aspecto (tabela 6), *skewness*, *orthogonality*, *smoothness*. A razão de aspecto é o parâmetro mais importante quando é necessária a optimização desta malha. Para esta optimização foi utilizada, por duas vezes consecutivas, uma ferramenta automática de eliminação de elementos problemáticos (razão de aspecto abaixo de 0.3), uma vez que se torna extremamente difícil aperfeiçoar esta malha tridimensional manualmente.

Tabela 6 - Quadro de qualidade de malha - Razão de aspecto

| Razão de aspecto | N.º de elementos | Percentagem (%) |
|------------------|------------------|------------------------|
| < 0.2 | 0 | 0 |
| 0.2 – 0.3 | 1 | 4.4 x 10 ⁻⁶ |
| 0.3 – 0.4 | 6300 | 2.8 |
| 0.4 – 0.5 | 8900 | 3.9 |
| 0.5 – 0.6 | 10200 | 4.5 |
| 0.6 – 0.7 | 18900 | 8.4 |
| 0.7 – 0.8 | 36800 | 16.3 |
| 0.8 – 0.9 | 59600 | 26.4 |
| 0.9 – 1.0 | 85100 | 37.7 |

Os parâmetros de processamento utilizados na parte experimental, foram introduzidos no Moldex3D, sendo que a máquina de injeção não existia na base de dados do software, tendo sido criada manualmente com os parâmetros característicos de máquina, tais como capacidade de injeção, diâmetro do fuso, pressão máxima de injeção, entre outros, de forma a se conseguir a aproximação máxima à realidade. O material plástico utilizado no processo, também não existente na base de dados do Moldex3D, foi criado manualmente na lista de materiais. Foram introduzidos todos os parâmetros característicos do material no que diz respeito à viscosidade, características PVT, índice de fluidez, propriedades mecânicas, condutividade térmica.

O modelo Cross 3 de viscosidade, usado no estudo reológico realizado em [13] e no presente estudo, rege-se pela equação:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}$$

em que η é a viscosidade (Pa.s), η_0 é a viscosidade a taxa de corte zero (Pa.s), τ^* é a tensão de relaxação, $\dot{\gamma}$ é a taxa de corte (1/s), n é o índice da lei de potência;

$$\eta_0 = D_1 \exp\left(\frac{-A(T - T_C)}{A_2 + (T - T_C)}\right)$$

$$T_C = D_2 + D_3 P$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 P$$

em que D_1 , A , T , D_2 , D_3 , \tilde{A}_2 são parâmetros característicos do material e P é a pressão (Pa).

Este modelo traduz uma boa aproximação na zona do 1º regime newtoniano (figura 3), assim como na região do comportamento pseudoplástico e aproximando-se do comportamento do modelo da lei de potência para elevadas taxas de corte. A caracterização mais precisa da dependência da temperatura na viscosidade é descrita pela equação William-Landel-Ferry. [15] Sendo que a viscosidade varia significativamente com a taxa de deformação e com a temperatura, para muito baixos valores de taxas de deformação, a viscosidade deve ser independente da taxa de corte, aproximando-se do seu valor máximo. Aumentando a temperatura, evidencia-se uma enorme influência na viscosidade. Aqui a equação William-Landel-Ferry descreve uma melhor dependência da temperatura. [16]

Diversos parâmetros são necessários para se conseguir usar a equação do modelo de viscosidade Cross 3, sendo estes parâmetros específicos respeitantes às características de viscosidade do material polimérico. Estes parâmetros encontram-se na tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros específicos de viscosidade do PP Moplen HP500N

| | |
|-----|--|
| n | 0.3446 |
| Tau | 18661.5 Pa |
| D1 | $7.92601 \text{ e}^{+11} \text{ Pa.s}$ |
| D2 | 263.15 K |
| D3 | 0 K/Pa |
| A1 | 25.436 |
| A2b | 51.6 K |

As características pressão - volume - temperatura (PVT) do material, neste estudo reológico, seguem o modelo modificado Tait 2 que se rege pela equação:

$$\hat{V} = \hat{V}_0 \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{P}{B} \right) \right] + \hat{V}_1$$

em que V é o volume específico, V_0 é o volume específico com referência a uma determinada condição, P é a pressão, V_1 caracteriza a mudança brusca de volume de um material semi-cristalino perto do ponto de fusão, T é a temperatura, T_1 caracteriza a mudança brusca de viscosidade de um material perto da sua temperatura de transição vítrea e b_{1s} , b_{2s} , b_{3s} , b_{4s} , b_{1l} , b_{2l} , b_{3l} , b_{4l} , b_5 , b_6 , b_7 , b_8 , b_9 e C, são parâmetros característicos do material polimérico.

$$\hat{V}_0 = \begin{cases} b_{1s} + b_{2s} \bar{T}, & se T \leq T_1 \\ b_{1l} + b_{2l} \bar{T}, & se T > T_1 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} b_{3s} \exp(-b_{4s} \bar{T}), & se T \leq T_1 \\ b_{3l} \exp(-b_{4l} \bar{T}), & se T > T_1 \end{cases}$$

$$\hat{V}_1 = \begin{cases} b_7 + (b_8 \bar{T} - b_9 P), & se T \leq T_1 \\ 0, & se T > T_1 \end{cases}$$

$$\bar{T} = T + b_1$$

$$T_i = b_5 + b_6 P$$

$$C = 0.0894$$

Tal como no modelo de viscosidade, também são necessárias variáveis específicas respeitantes às características PVT do material polimérico, para se

conseguir usar a equação do modelo modificado Tait 2. Estas variáveis encontram-se na tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros específicos PVT do PP Moplen HP500N

| | |
|-----|---|
| b1L | $0.001285 \text{ m}^3 / \text{Kg}$ |
| b2L | $1.073 \text{ e}^{-06} \text{ m}^3 / \text{Kg.K}$ |
| b3L | $8.44021 \text{ e}^{+007} \text{ Pa}$ |
| b4L | 0.006004 1/K |
| b1S | $0.001164 \text{ m}^3 / \text{Kg}$ |
| b2S | $5.282 \text{ e}^{-07} \text{ m}^3 / \text{Kg.K}$ |
| b3S | $1.63138 \text{ e}^{+08} \text{ Pa}$ |
| b4S | 0.005623 1/K |
| b5 | 427.15 K |
| b6 | $6.05 \text{ e}^{-09} \text{ K/Pa}$ |
| b7 | $0.0001208 \text{ m}^3 / \text{Kg}$ |
| b8 | 0.1679 1/K |
| b9 | $1.468 \text{ e}^{-08} \text{ 1/Pa}$ |

Utilizando o algoritmo de cálculo do modelo de escoamento de Navier Stokes e o modelo de viscosidade de Cross Williams-Landel-Ferry (modelo Cross 3) foram efectuadas as nove simulações de enchimento com base no vector ortogonal L9 do Método DOE de Taguchi (tabela 2), utilizado no caso experimental [13].

No capítulo seguinte são apresentados os resultados relevantes, retirados das simulações numéricas realizadas, que são o comprimento de fluxo máximo nos pinos e a queda de temperatura na sua extremidade.

Resultados do estudo reológico e discussão

Após a realização das 9 simulações propostas, foi verificado o comprimento das frentes de fluxo dos cinco pinos. A figura 9 mostra o resultado de enchimento obtido para a primeira das combinações de parâmetros (1_111) apresentada na tabela 2 (situação crítica atingida na parte experimental – menor comprimento enchido dos micro-pinos/menor capacidade de enchimento). Todos os pinos foram completamente cheios pelo material injectado em todos os casos de estudo.

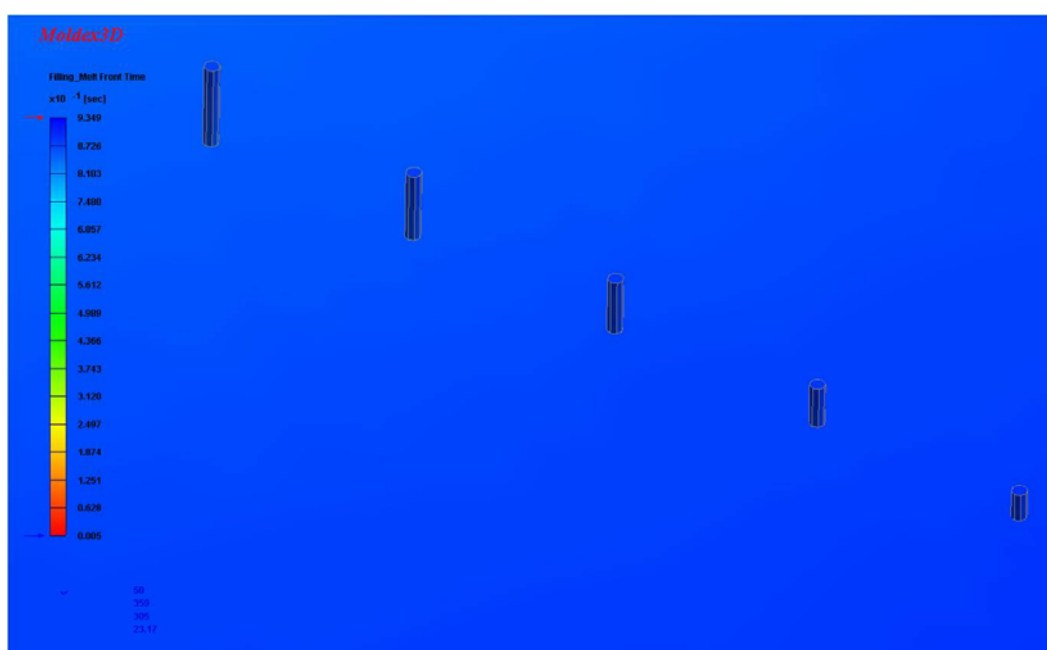


Fig. 9 - Enchimento total de todos os micro-pinos (fim da compactação)

Relativamente à queda de temperatura (figura 10) na extremidade dos pinos, foram retirados os valores da temperatura de frente de fluxo do material no fim do enchimento em todas as extremidades dos pinos. Na figura 10 verifica-se que no interior dos pinos o material tende a arrefecer mais do que na superfície exterior devido ao atrito provocado pelo escoamento do material polimérico junto à cavidade moldante que faz aumentar a sua temperatura exteriormente. Os valores de temperatura internos não foram possíveis medir com exactidão.

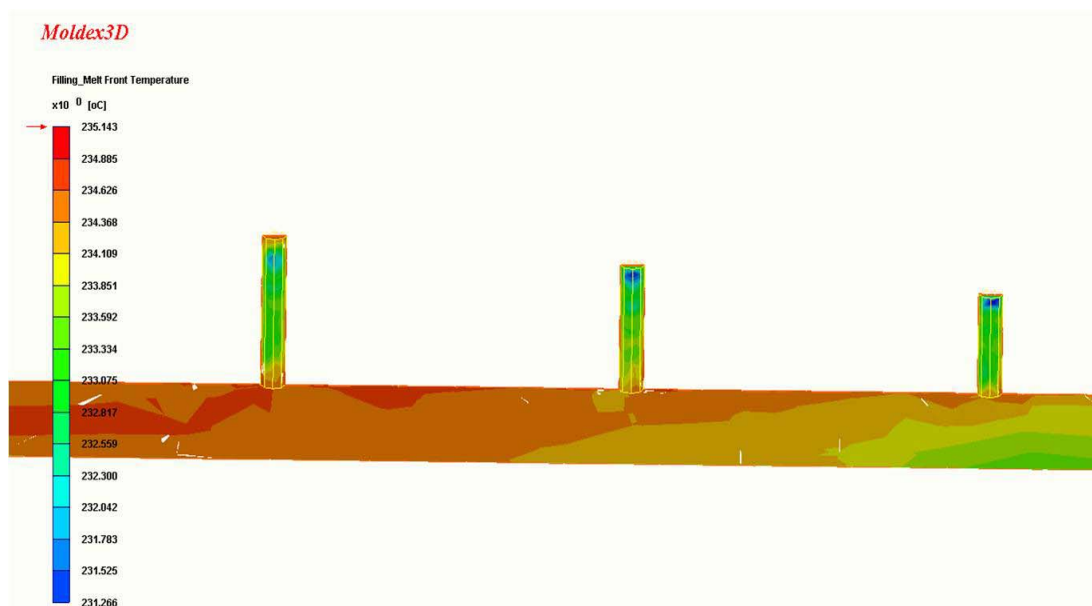


Fig. 10 – Distribuição da temperatura de frente de fundido (corte)

A tabela 9 mostra os valores de temperaturas existentes em cada pino.

Tabela 9 - Temperatura de frente de fluxo na extremidade dos pinos

| | Temperatura (°C) | | | | |
|---|------------------|--------|--------|---------|---------|
| | 400 µm | 600 µm | 800 µm | 1000 µm | 1200 µm |
| 1 | 219.83 | 219.95 | 219.41 | 218.77 | 217.59 |
| 2 | 219.85 | 219.80 | 219.90 | 219.96 | 219.22 |
| 3 | 219.98 | 219.97 | 219.99 | 219.99 | 219.69 |
| 4 | 234.82 | 234.64 | 234.88 | 234.96 | 234.15 |
| 5 | 234.99 | 234.99 | 234.94 | 234.97 | 234.21 |
| 6 | 234.94 | 232.86 | 234.43 | 234.37 | 234.88 |
| 7 | 249.78 | 249.85 | 249.97 | 249.97 | 249.56 |
| 8 | 249.03 | 248.45 | 249.51 | 249.77 | 247.28 |
| 9 | 250.00 | 249.65 | 249.88 | 249.92 | 249.43 |

À semelhança do exposto no capítulo anterior, a queda de temperatura registada para os casos em questão, é possível de analisar no gráfico 2.

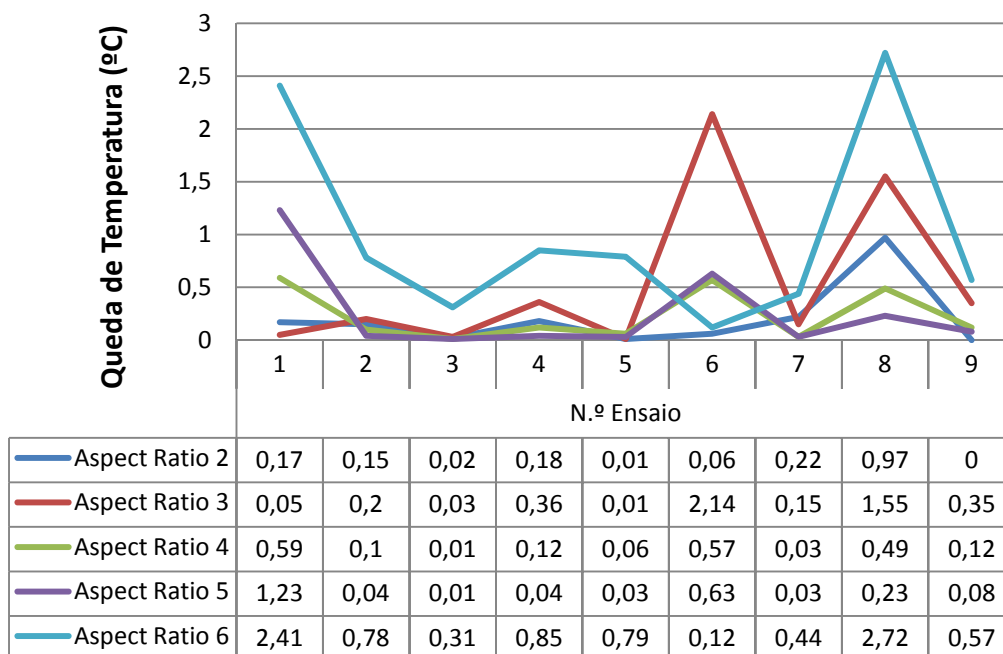


Gráfico 2 - Queda de temperatura

No que diz respeito à veracidade do cálculo reológico quando comparado com os casos experimentais obtidos, pode verificar-se que existe uma grande discrepância entre eles. Enquanto os resultados experimentais mostram o não enchimento de praticamente todos os pinos para todas as nove situações em estudo, pelo facto do arrefecimento brusco do material na zona de escoamento dos pinos, devido ao efeito de hesitação criado com o reduzido diâmetro dos mesmos à escala micro, o estudo reológico indica o enchimento por completo de todos os pinos para todos os casos simulados, dando a entender que o software Moldex3D, utilizando as equações numéricas descritas anteriormente, não se aproxima da realidade, para os casos de moldação por injeção à micro-escala. No entanto, os resultados de enchimento obtidos pelo Moldex3D e pelo Moldflow MPI6.2 são em tudo semelhantes, para as características de malha expostas no estudo [13] e para os mesmos parâmetros de injeção.

Relativamente à queda de temperatura da frente de fluxo na extremidade dos pinos, o Moldex3D, utilizando as mesmas equações que foram utilizadas pelo Moldflow, também não consegue prever com exactidão as quedas reais de temperatura existentes. Os resultados reológicos mostram uma queda de temperatura, para a maioria dos casos, na ordem das décimas de grau

centígrado, o que não seria suficiente para existir uma camada solidificada que permitisse obter os resultados de frente de fluxo demonstrados na realidade (geralmente é necessário que o material arrefeça aproximadamente 20 – 30 °C). Poucos dos valores calculados pelo Moldex3D, para este caso, poderão indicar uma tendência real da queda de temperatura relativamente à realidade. Os resultados de enchimento ao demonstrarem o enchimento por completo de todos os pinos, verifica-se que a queda de temperatura existente não é suficiente para solidificar o material nos pinos, uma vez que ambos os resultados de frente de fluxo e temperatura de frente de fundido se encontram directamente interligados. Apesar de os ensaios que mostram uma maior queda de temperatura serem os mesmos que os apresentados pelo Moldflow (ensaios 1, 6 e 8), neste caso, comparativamente ao Moldflow, o Moldex3D fica a perder visto que o Moldflow consegue obter resultados que exibem uma maior aproximação ao sucedido experimentalmente, ou seja, uma maior queda de temperatura, o que indica a incapacidade de enchimento dos micro-pinos verificada.

Com os resultados apresentados, torna-se por demais evidente, a débil aproximação entre a simulação numérica, por parte do Moldex3D utilizando o módulo 3D com o modelo reológico e condições de processamento descritos anteriormente, e a realidade no que diz respeito ao comportamento de fluxo em microcavidades.

Estudos reológicos (refinação de malha)

Com vista a se encontrar um modelo de viscosidade que consiga traduzir com exactidão o comportamento de um polímero dentro de uma microcavidade, é proposto usar um diferente modelo de viscosidade do utilizado anteriormente, disponibilizado pelo Moldex3D. O moldex3D suporta os modelos de viscosidade com base no fluido newtoniano, modelo lei de potência, Cross 1, Cross 2 e Cross 3, Carreau e Carreau-Yasuda. Contudo, a alteração de modelo reológico não é possível ser realizada directamente, ou seja, alterando simplesmente de modelo reológico no material seleccionado. Esta alteração resulta numa mensagem de possível divergência de resultados uma vez que os valores de todos parâmetros suportados pelo modelo seleccionada permanecem inalterados. Este facto foi, também, confirmado pela empresa Coretech Systems, criadora do software Moldex3D, por escrito.

Assim, e com o intuito de se encontrar uma melhor aproximação dos resultados das simulações numéricas aos obtidos experimentalmente foram realizados outros dois estudos numéricos, onde se refinou a malha de triângulos bidimensional. No primeiro estudo a malha bidimensional foi refinada de modo à malha tridimensional ser constituída por, aproximadamente, duas vezes mais elementos que no estudo reológico do capítulo anterior. No segundo estudo a malha foi refinada de maneira à malha 3D ser constituída por, aproximadamente, cinco vezes mais elementos que no estudo reológico precedente.

1º Estudo

A malha de triângulos bidimensional foi novamente gerada sobre as superfícies exteriores do CAD com dimensões de aresta de 0.6 mm para os triângulos da placa e canal de injeção. A malha dos micro-pinos foi, uma vez mais, refinada com uma dimensão de aresta de triângulo de 0.05 mm (figura 11).

A malha bidimensional, foi optimizada de maneira a se eliminar qualquer elemento com razão de aspecto abaixo de 0.6 (tabela 10). A razão de aspecto

média resultante foi de 0.98. A quantidade de elementos bidimensionais na malha de superfície é de 63476.

Tabela 10 – Quadro de qualidade de malha bidimensional

| Razão de aspecto | < 0.6 | 0.6 – 0.7 | 0.7 – 0.8 | 0.8 – 0.9 | 0.9 – 1.0 |
|------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| N.º de elementos | 0 | 9 | ~ 1200 | ~ 2000 | ~ 60200 |
| Percentagem (%) | 0 | ~ 0.1 | ~ 1.9 | ~ 3.2 | ~ 94.8 |

Após a optimização da malha bidimensional, foi gerada a malha sólida BLM (figura 12). A quantidade de elementos sólidos gerados foi de 451709, sendo o número de elementos aproximadamente o dobro dos elementos do estudo anterior. A razão de aspecto média é 0.85.

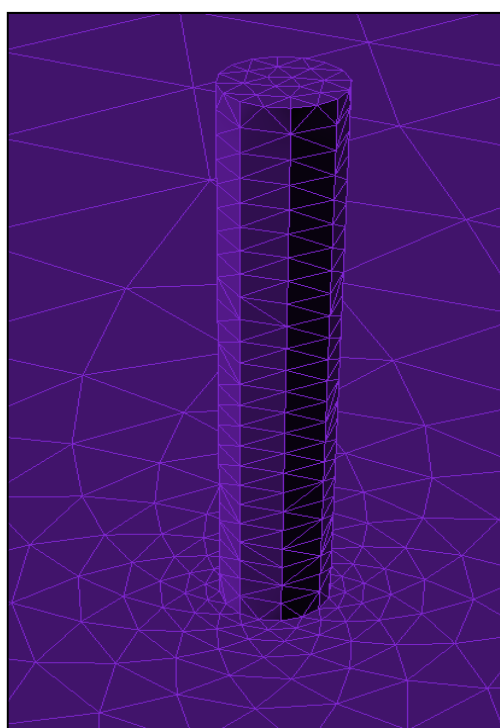


Fig. 11 - Malha bidimensional

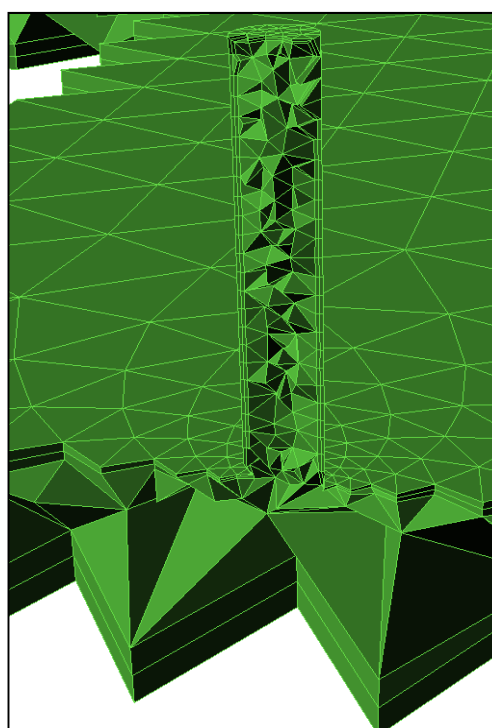


Fig. 12 - Malha tridimensional (interior)

No presente estudo, não foi necessário proceder ao arranjo dos elementos com razão de aspecto abaixo de 0.3, usando a ferramenta automática de eliminação

de elementos problemáticos, uma vez que na detecção de elementos com razão de aspecto abaixo de 0.3, utilizando uma ferramenta que realiza a detecção automática destes elementos, não foi encontrado qualquer elemento (tabela 11).

Tabela 11 - Quadro de qualidade de malha - Razão de aspecto

| Razão de aspecto | N.º de elementos | Percentagem (%) |
|------------------|------------------|-----------------|
| < 0.3 | 0 | 0 |
| 0.3 – 0.4 | 579 | ~ 0.13 |
| 0.4 – 0.5 | ~ 1200 | ~ 0.27 |
| 0.5 – 0.6 | ~ 7900 | ~ 1.8 |
| 0.6 – 0.7 | ~ 65800 | ~ 14.6 |
| 0.7 – 0.8 | ~ 76300 | ~ 16.9 |
| 0.8 – 0.9 | ~ 115800 | ~ 25.6 |
| 0.9 – 1.0 | ~ 184000 | ~ 40.7 |

2º Estudo

A malha de triângulos bidimensional foi gerada com dimensões de aresta de 0.4 mm para os triângulos da placa e canal de injeção. A malha dos micro-pinos foi refinada com dimensão de aresta de triângulo de 0.04 mm (figura 13).

A optimização da malha bidimensional foi realizada nas mesmas condições dos estudos anteriores (tabela 12). A razão de aspecto média atingida foi de 0.99. Os elementos bidimensionais resultantes foram 141042.

Tabela 12 – Quadro de qualidade de malha bidimensional

| Razão de aspecto | < 0.6 | 0.6 – 0.7 | 0.7 – 0.8 | 0.8 – 0.9 | 0.9 – 1.0 |
|------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| N.º de elementos | 0 | 15 | 711 | ~ 3300 | ~ 137000 |
| Percentagem (%) | 0 | ~ 0.01 | ~ 0.5 | ~ 2.4 | ~ 97.1 |

Após a optimização da malha bidimensional, foram gerados os elementos sólidos BLM (figura 14). O número de elementos sólidos gerados foi 1165608,

sendo o número de elementos aproximadamente cinco vezes mais dos elementos do estudo do capítulo 'Estudo reológico – Moldex3D'. A razão de aspecto média foi 0.86.

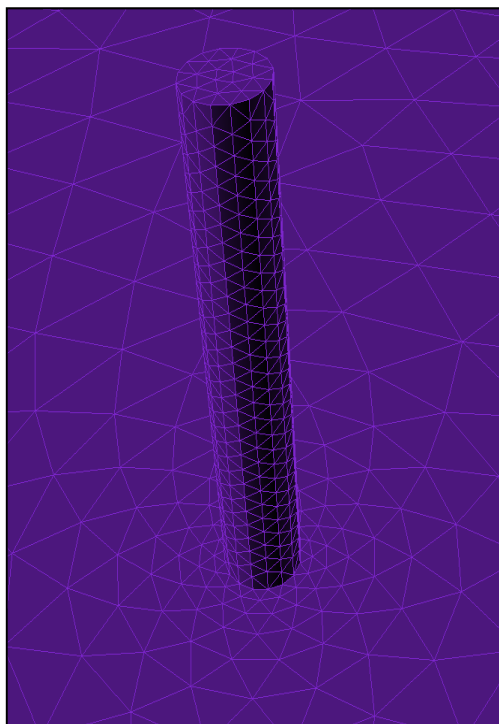


Fig. 13 - Malha bidimensional

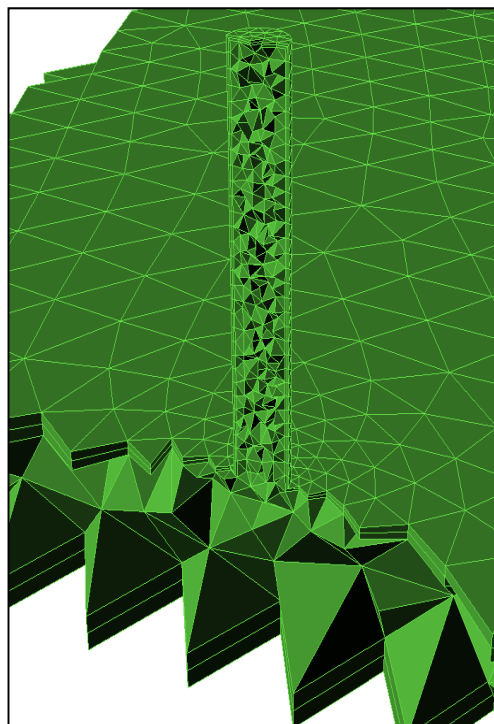


Fig. 14 - Malha tridimensional (interior)

Analogamente ao 1º estudo, não foi necessário proceder ao arranjo dos elementos do tipo BLM.

Tabela 13 - Quadro de qualidade de malha - Razão de aspecto

| Razão de aspecto | N.º de elementos | Percentagem (%) |
|------------------|------------------|-----------------|
| < 0.3 | 0 | 0 |
| 0.3 – 0.4 | 141 | ~ 0.01 |
| 0.4 – 0.5 | ~ 1300 | ~ 0.1 |
| 0.5 – 0.6 | ~ 17300 | ~ 1.5 |
| 0.6 – 0.7 | ~ 91200 | ~ 7.8 |
| 0.7 – 0.8 | ~ 201300 | ~ 17.3 |
| 0.8 – 0.9 | ~ 367900 | ~ 31.6 |
| 0.9 – 1.0 | ~ 486500 | ~ 41.7 |

Em ambos os estudos realizados, foi seleccionada a combinação de parâmetros que originou os resultados experimentais críticos, ou seja, o caso onde foram alcançados os piores resultados. A situação onde ocorreu maior incapacidade de enchimento, já evidenciada anteriormente, foi a primeira combinação de parâmetros, expressa na tabela 2 (1_111 – Temperatura de fundido = 220 °C, temperatura de molde = 20 °C, velocidade de injeção = 20 % da velocidade máxima). Foi realizada apenas a simulação numérica, para cada um dos estudos descritos anteriormente, que corresponde à situação crítica obtida experimentalmente.

Resultados dos estudos reológicos e discussão

1º Estudo

Após a realização do primeiro estudo com malha refinada, foram analisados os resultados de enchimento dos micro-pinos. A figura 15 mostra o comprimento de fluxo ocorrido nos micro-pinos no fim de enchimento, antes de a pressão de compactação ser induzida. Verifica-se que ocorre elevada hesitação nos micro-pinos de 1200 μm , 1000 μm e 800 μm , até este momento.

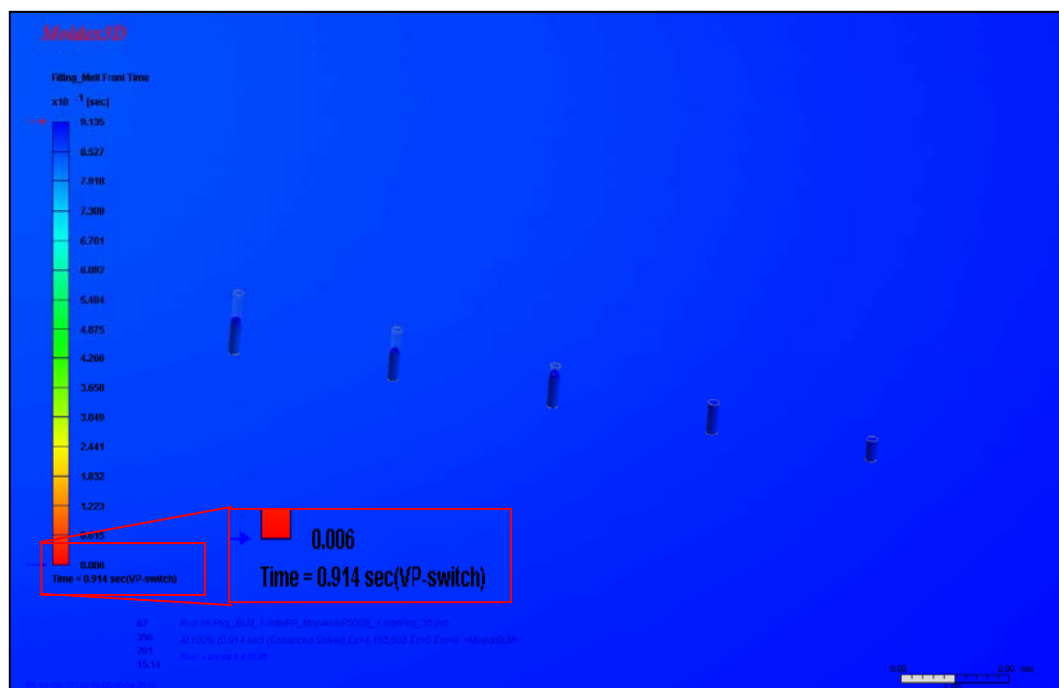


Fig. 15 - Enchimento incompleto dos pinos (fim de enchimento) – 1º estudo

A figura 16 demonstra o enchimento dos micro-pinos após a pressão de compactação ser induzida. Aqui verifica-se que a pressão de compactação acaba de encher todos os micro-pinos, aproximadamente, apenas 0.03 segundos após ter sido aplicada.

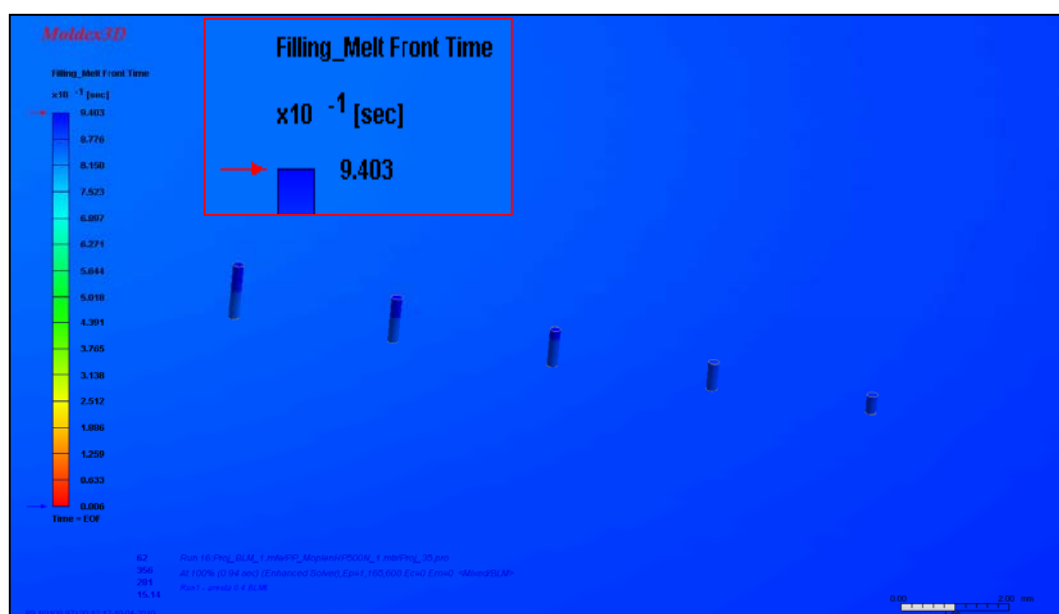


Fig. 16 - Enchimento completo dos pinos (início da compactação) – 1º estudo

Os resultados da profundidade alcançada no enchimento dos micro-pinos podem ser analisados na tabela 14

Tabela 14 - Resultados de comprimento de fluxo e temperatura de frente de fundido - 1º estudo

| Fim do enchimento/Comutação (98 % do enchimento) | | | 0.03s de pressão de compactação (100 % do enchimento) |
|---|------------------------------------|------------------------------|--|
| Compr. fluxo alcançado (μm) | Temp. de frente de fundido (°C) | Queda de temperatura (°C) | Temp. frente fundido na extremidade do pino (°C) |
| 600 | 125.1 | 94.9 | 202.0 |
| 550 | 139.6 | 80.4 | 196.6 |
| 450 | 123.9 | 96.1 | 190.0 |
| 600 | 204.1 | 15.9 | 204.1 |
| 400 | 210.1 | 9.9 | 210.1 |

Os resultados de comprimento de fluxo alcançado apresentam-se com um erro de medição provocado pelo facto de apenas ser possível realizar medições entre vértices dos elementos triangulares exteriores do modelo, não sendo possível extrair o seu valor exacto de comprimento alcançado (analogamente ao que acontece no 2º estudo).

Relativamente à temperatura de frente de fundido, foram retirados os valores de temperatura (tabela 14) aquando da fase de comutação (elevada hesitação do material) e 0.03s após ter iniciado a fase de compactação (fim de enchimento). Estes podem ser visualizados na figura 17, onde se pode examinar a diferença de temperatura existente nos micro-pinos entre a zona de enchimento a 98%, que representa a fase de comutação da pressão de enchimento para a pressão de compactação (temperatura mais baixa – cor azul), e no início da compactação (extremidade dos micro-pinos).

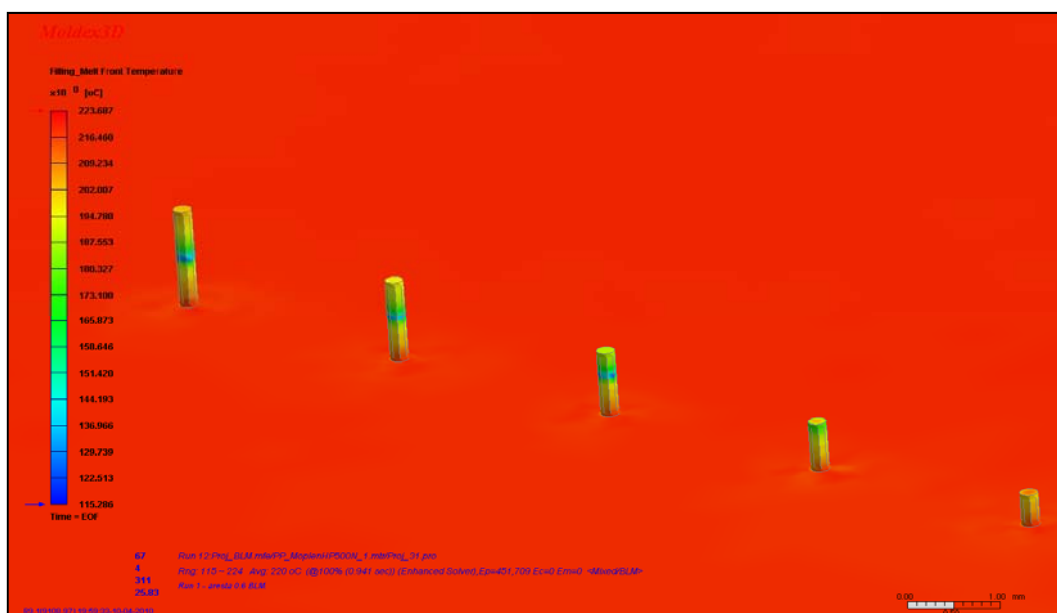


Fig. 17 - Temperatura de frente de fundido (0.03s de pressão de compactação) – 1º estudo

Pela análise dos resultados de enchimento antes de se ter dado início à pressão de compactação, verifica-se a existência de uma elevada hesitação ao escoamento do material nos micro-pinos, respectivamente nos de maior razão de aspecto (4, 5 e 6), não enchendo por completo estes três micro-pinos até esta fase. Os outros dois micro-pinos encontram-se completamente cheios na fase evidenciada anteriormente. Isto aponta para uma aproximação ao sucedido experimentalmente, sendo que para a combinação de parâmetros utilizada (1_111 da tabela 2) os resultados experimentais mostram o não enchimento dos quatros micro-pinos de maior comprimento. Nesta fase, de 98 % do enchimento, obtém-se uma aproximação à incapacidade de enchimento demonstrada na

realidade. Comparando os valores registados na tabela 3 e na tabela 14, para a mesma combinação de parâmetros e, em termos do comprimento de enchimento alcançado nos micro-pinos, observa-se uma aproximação dos resultados obtidos na simulação numérica, até à fase de comutação, e no caso experimental, o que sugere que o modelo de viscosidade utilizado no Molde3D, para as condições de malha 3D utilizadas neste estudo consegue dar uma boa aproximação à realidade, não sendo, mesmo assim, muito precisa. Analisando a queda de temperatura expressa na tabela 14, verifica-se que a queda de temperatura existente nos três micro-pinos de razão de aspecto maior, é suficiente para solidificar o material em cada extremidade de frente de fluxo, suportando a incapacidade de enchimento demonstrada até aos 98% de enchimento (geralmente é necessário que o material arrefeça aproximadamente 20 – 30 °C para ocorrer incapacidade de enchimento).

Contudo, os resultados medidos na parte experimental foram registados após a pressão de compactação ter sido induzida por completo. Aqui o modelo de viscosidade utilizado no Moldex3D falha (figura 17), não conseguindo calcular correctamente o não escoamento do material polimérico, visto que os todos os micro-pinos acabam o seu enchimento. Analisando a tabela 14, verifica-se um aumento de temperatura do material polimérico, razão pela qual se dá o restante enchimento. Este aumento de temperatura sugere que ocorre aquecimento do material pelo atrito gerado nas paredes da cavidade devido à grande restrição ao enchimento provocado pela camada de material solidificada e a pressão exercida pela compactação. No entanto, para a queda de temperatura existente no momento da comutação (tabela 14), não deveria ocorrer o fenómeno do atrito visto o material plástico solidificado na extremidade não permitir o restante enchimento, facto evidenciado na parte experimental do estudo.

Assim, constata-se que, apesar de o modelo de viscosidade Cross-WLF do Moldex3D, para o caso em estudo, consegue aproximar-se, em medida, dos resultados reais, não se aproximando, contudo com elevada precisão. Isto sugere que o modelo de viscosidade Cross-WLF, utilizando o Moldex3D com condições de malha atrás descritas, terá ainda de ser melhor adaptado a situações de simulação numérica, em casos de reologia em microcavidades.

2º Estudo

Após a realização do segundo estudo com malha refinada, verificou-se que, como acontece no 1º estudo, o enchimento dos micro-pinos não se concretizou (figura 18). Constata-se que ocorre a mesma elevada hesitação nos micro-pinos de 1200 μm , 1000 μm e 800 μm , até ao momento de 98% de enchimento.



Fig. 18 - Enchimento incompleto dos pinos (fim de enchimento) – 2º estudo

Analogamente ao sucedido no 1º estudo, neste 2º estudo verificou-se também que o enchimento completo dos micro-pinos sucede após a pressão de compactação ser induzida. Foi necessário o mesmo tempo (0.03 segundos) de pressão de compactação, para se dar o enchimento por completo dos micro-pinos.

Os resultados da profundidade alcançada no enchimento dos micro-pinos podem ser analisados na tabela 15.

Tabela 15 - Resultados de comprimento de fluxo e temperatura de frente de fundido - 2º estudo

| Fim do enchimento/Comutação (98 % do enchimento) | | | 0.03s de pressão de compactação (100 % do enchimento) |
|---|------------------------------------|------------------------------|--|
| Compr. fluxo alcançado (µm) | Temp. de frente de fundido (°C) | Queda de temperatura (°C) | Temp. frente fundido na extremidade do pino (°C) |
| 640 | 120.9 | 99.1 | 202.0 |
| 560 | 130.5 | 89.5 | 197.2 |
| 600 | 124.3 | 95.7 | 172.2 |
| 600 | 208.3 | 11.7 | 208.4 |
| 400 | 212.8 | 7.2 | 212.9 |

No que diz respeito à temperatura de frente de fundido, podem ser visualizados os valores de temperatura (tabela 15) no momento em que ocorre elevada hesitação do material (98% do enchimento) e 0.03s após de ter iniciado a fase de compactação (fim de enchimento). A figura 19 mostra a diferença de temperatura existente nos micro-pinos entre a zona de enchimento a 98% (temperatura mais baixa – cor azul) e o início da compactação (extremidade dos micro-pinos).



Fig. 19 - Temperatura de frente de fundido (0.03s de pressão de compactação) – 2º estudo

Neste segundo estudo foram alcançados resultados de incapacidade de enchimento dos micro-pinos, comprimento de enchimento alcançado e temperatura de frente de fundido (tabela 15), muito semelhantes aos obtidos no 1º estudo, pelo que todas as conclusões obtidas no 1º estudo são também aplicáveis neste 2º estudo.

Constata-se com este 2º estudo que, um melhor refinamento de malha tridimensional, não origina, necessariamente, resultados mais precisos quando comparando com os experimentalmente conseguidos. Assim, para se conseguirem os resultados aqui expostos não é necessário despende de maior tempo de simulação, devido ao maior número de elementos tridimensionais (aproximadamente cinco vezes mais elementos que no estudo de comparação com o Moldflow) que foram utilizados neste 2º estudo.

Conclusões

Após a análise e recolha dos dados mais relevantes do estudo reológico realizado no Moldflow MPI, intitulado por “On the suitability of the conventional injection moulding process for micro featured parts replication – a DOE approach” [13], foi possível proceder à realização de um outro estudo reológico recorrendo ao software de simulação numérica Moldex3D. Deste estudo pôde-se concluir que, assim como, no estudo realizado no Moldflow, o Moldex3D não consegue reproduzir o comportamento de escoamento do polímero numa microcavidade, representada por um canal frio agregado a uma placa com 5 micro-pinos de profundidades diferentes. Isto foi concluído devido a no caso experimental se ter verificado que em muitos casos não foi possível encher por completo os micro-pinos, sendo que, tanto no estudo realizado no Moldflow quer no realizado no Moldex3D, foi verificado que todos os micro-pinos foram enchidos por completo. Daqui foi concluído que com o modelo de viscosidade (modelo Cross 3) empregue nos estudos reológicos, não se consegue reproduzir o comportamento em microcavidades, para as condições de malha utilizadas, tanto num como noutro software de simulação numérica, o que leva a constatar que, especificamente, para o modelo de viscosidade utilizado, fica a ser necessário o desenvolvimento deste modelo no que diz respeito à sua adaptabilidade a casos de simulação numérica em microcavidades. Concluiu-se ainda que a previsão da temperatura de frente de fundido nos micro-pinos é melhor quantificada pelo Moldflow do que pelo Moldex3D, para as mesmas condições de malha, sendo que a previsão fornecida pelo Moldflow aponta para a existência de solidificação do material no escoamento nos micro-pinos, o que se torna uma indicação para o não enchimento dos micro-pinos que ocorre na realidade. Aqui o Moldex3D não consegue fornecer uma previsão que indique o mesmo, sendo que a queda de temperatura existente não foi suficiente para ocorrer solidificação prematura do polímero (queda de temperatura na ordem das décimas de grau centígrado). Mesmo assim, e apesar destes últimos resultados não apontarem para a solidificação do material dentro dos micro-pinos, os valores de temperatura de frente de fundido estão de acordo com os resultados de enchimento apresentados, o que não sucede no estudo realizado pelo Moldflow MPI.

Após a realização do estudo reológico anterior, foram realizados os outros dois estudos reológico onde foi refinada a malha 3D com intuito de se verificar a melhor aproximação, ou não, do sucedido experimentalmente. Com a realização destes estudos pôde-se concluir que até à fase em que ocorre a comutação, ou seja a passagem da injeção para a fase em que induzida a pressão de compactação, os resultados apontam para uma melhor aproximação, visto que ocorre hesitação brusca do material, não enchendo por completo os três micro-pinos de maior razão de aspecto, o que aponta para uma aproximação à realidade, podendo neste caso o modelo de viscosidade utilizado ser considerado como viável, sob efeito das restrições apresentadas de seguida. Contudo, como a incapacidade de enchimento medida experimentalmente foi realizada após a pressão de compactação ser induzida, na simulação numérica verifica-se o enchimento por completo no início desta fase, concluindo-se que apenas até à fase de comutação é possível obter uma boa aproximação da incapacidade de enchimento verificada na realidade. Isto poderá suceder devido ao facto do cálculo numérico do atrito gerado nas paredes das microcavidades ser sobredimensionado, no momento da pressão de compactação, e assim gerar aquecimento suficiente para reaquecer o material solidificado e assim se concluir o enchimento dos micro-pinos, o que não sucede na realidade. Isto terá de ser comprovado experimentalmente num futuro possível caso de estudo. Relativamente às quedas de temperatura ocorridas nos dois estudos conduzidos, constata-se que até ao momento antes da pressão de compactação ser induzida, os estudos em questão podem ser considerados como verdadeiros, visto que as quedas de temperaturas apresentadas vão de encontro ao sucedido no enchimento, ou seja, ocorre uma queda de temperatura superior ao valor teórico (solidificação ocorre para quedas de temperatura superiores a 20-30 °C), sendo que após a pressão de compactação ser induzida, a temperatura nos micro-pinos aumenta, levando à falha do modelo reológico.

Conclui-se então, que para estes casos de estudos, o modelo de viscosidade Cross 3 também falha, não sendo, contudo, por completo, mas não conseguindo reproduzir o comportamento de escoamento de polímeros nas microcavidades, necessitando de ser mais aprofundado/adaptado para poder ser empregue em estudos à escala micro, facto evidenciado também anteriormente na literatura.

Referências Bibliográficas

- [1] Sinotech Electric Motors Homepage, website: <http://www.oshore.com>, acesso em Maio de 2010
- [2] Orenstein, Beth W., "Micromolding Techniques Grow with Demand", publicação Med-Tech Precision, Outono 2008.
- [3] Su, Yu-Chuan, Shah, Jatan, Lin, Liwei, "Implementation and analysis of polymeric microstructure replication by micro injection molding", Journal Micromechanics and Microengineering, 14 (2004) 415-422, Dezembro 2003.
- [4] Hecke, M., Schomburg, W. K., "Review on micro molding of thermoplastic polymers", Journal Micromechanics and Microengineering, 14 (2004) R1-R14, Dezembro 2003
- [5] Becker, Holger e Gärtner, Claudia, "Polymer microfabrication technologies for microfluidic systems", Anal Bioanal Chem (2008), 390:89-111, Outubro 2007
- [6] Gornik, Christian, "Injection Moulding of Parts with Microstructured Surfaces for Medical Applications", Macromol. Symp. 2004, 217, 365-374
- [7] J. Ferrell, Nicholas, Woodard, James, J. Hansford, Derek, "Fabrication of suspended polymer microstructures using sacrificial layer Micromolding and patterned substrate Micromolding", American Society for Precision Engineering, Primavera 2005
- [8] Glendenning, Paul, "High-Aspect Ratio Micro Moulding for Applications in Dental Surgery", The Magazine for the Global Micro Manufacturing Technology Community (online), Junho 2009
- [9] Whynott, John, "Micro Moulding: A Cost Effective Alternative to Micro Machining", publicação Micro Moulding magazine, Janeiro 2004

- [10] Documentos de apoio do Moldex3D R9.1, Coretech Systems, 2009
- [11] Yu L, Lee L, Koelling K. Flow and Heat Transfer Simulation of Injection Molding with Microstructures. Polym. Eng. Sci. 2004; 44(10): 1866-1876
- [12] Attia, Usama M., Marson, Silvia, R. Alcock, Jeffrey, "Micro-Injection Moulding of Polymer Microfluidic Devices", Microfluidics and Nanofluidics, V7-N1-P1-28, July 2009
- [13] Zhil'tsova, T.V; Neto, VF; Ferreira, J; Oliveira, MSA; "On the suitability of the conventional injection moulding process for micro featured parts replication – a DOE approach", ICIT & MPT 2009 International Conference, Ljubljana, Slovenia, 4-7 October 2009 (ORAL)
- [14] M. Melo e Coelho, Paula, "Método de Taguchi: Controlo de qualidade com recurso não-convencional ao desenho estatístico de experiências (DOE)", Instituto Nacional de Estatística de Portugal, 8 de Junho de 2001
- [15] Osswald, Tim A., Turng, Lih-Sheng, Gramann, Paul, Injection Molding Handbook, 2ª edição, Hanser Gardner Publications, Inc, 2007
- [16] Dealy, Jonh M., Saucier, Peter C., Rheology in Plastics Quality Control, Hanser Gardner Publications, Inc, 2000